



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta textilní



LASEROVÁ MODIFIKACE VLASOVÝCH TEXTILIÍ

Diplomová práce

Studijní program: N3957 – Průmyslové inženýrství
Studijní obor: 3901T073 – Produktové inženýrství

Autor práce: **Gabriela Benešová**
Vedoucí práce: prof. Ing. Jakub Wiener, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Textile Engineering



LASER MODIFICATION PILE FABRICS

Diploma thesis

Study programme: N3957 – Industrial Engineering
Study branch: 3901T073 – Product Engineering

Author: **Gabriela Benešová**
Supervisor: prof. Ing. Jakub Wiener, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Gabriela Benešová**
Osobní číslo: **T12000597**
Studijní program: **N3957 Průmyslové inženýrství**
Studijní obor: **Produktové inženýrství**
Název tématu: **Laserová modifikace vlasových textilií**
Zadávací katedra: **Katedra hodnocení textilií**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vypracujte literární rešerši
2. Vybrané vlasové textilie vystavte působení laseru za definovaných podmínek, sledujte vliv intenzity ozařování na změny vlastností vybrané textilie
3. Při vyhodnocování vlastností se zaměřte zejména na barevnost a její ovlivnění úhlem pozorování
4. Vedle standardního kolmého ozařování textilie laserem sledujte vliv směru dopadu laserového paprsku na výslednou barevnost textilie
5. Pokuste se využít laseru k vytvoření jinými způsoby nedosažitelných efektů na vlasových textiliích
6. Výsledky diskutujte z hlediska praktické využitelnosti v oděvních textiliích

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: 50 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Dohnal, M.: Lasery a jejich aplikace v polygrafii, Pardubice, Univerzita Pardubice, 2008

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Jakub Wiener, Ph.D.**

Katedra materiálového inženýrství

Konzultant diplomové práce: **Ing. Marie Štěpánková**

Katedra materiálového inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **16. ledna 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **8. ledna 2015**


Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka




doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 7. září 2014

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum:

Podpis:

Poděkování:

Ráda bych poděkovala především panu prof. Ing. Jakubu Wienerovi, Ph.D. za odborné vedení mé diplomové práce, za cenné rady a pomoc, připomínky, ochotu a trpělivost. Dále bych chtěla poděkovat své konzultantce Ing. Marii Štěpánkové za technickou pomoc, psaní této práce a v neposlední řadě za její cenné rady.

Poděkování dále náleží Ing. Marcele Kolínové, Ph.D. za odbornou pomoc při práci na počítačové tomografii a Ing. Janě Grabmüllerové za pomoc na rastrovací elektronové mikroskopii v laboratořích na Katedře materiálového inženýrství.

Na závěr bych chtěla také poděkovat své rodině za psychickou podporu a materiální pomoc, kterou mi během studia věnovali, a bez kterých by tato práce nikdy nevznikla. Díky patří i mým nejbližším přátelům a spolu studujícím kolegům za vzájemnou pomoc a povzbuzování během doby studia.

Gabriela Benešová

Anotace:

Cílem této práce je vytvořit novou technologií úpravy vlasových textilií pomocí vzorování textilního materiálu laserovým zařízením Marcatex 150 Flexi. U vzorování materiálu laserovým paprskem je do textilie vyryt reliéf, který nejde napodobit žádnou jinou technologií. V této práci byla testována různá nastavení laserového paprsku, který působil na textilním materiálu s vlasem, pro zjištění nejlepších kombinací parametrů laseru za účelem nového vzorování vlasových textilií. Dále se sledovala změna struktury materiálu při působení laserového paprsku na materiál pod různými úhly, které se využilo při nové úpravě vlasové textilie.

Klíčová slova: laser, vlasové textilie, délka pulzu

Annotation

The goal of the thesis is to create new technology for adjustment of pile fabrics, with help of patterning of textile material via laser machine Marcatex 150 Flexi. During patterning the material with a laser beam there is relief engraved into the textile, which cannot be imitated by any other technology. In this thesis there has been tested many settings of the laser beam on textile material with pile for finding out the best combination of parameters of lasers in order to new patterning of pile fabrics. Onward the change of material structure was observed during the functioning of the laser beam on the material under different angles, the functioning was used during new adjustment of pile fabrics.

Keywords: laser, pile fabrics, laser pulse length

Obsah

ÚVOD	11
TEORETICKÁ ČÁST	12
1 LASEROVÁ TECHNOLOGIE	12
1.1 FYZIKÁLNÍ PRINCIP	12
1.2 TYPY LASERŮ	14
1.2.1 PEVNOLÁTKOVÉ LASERY	14
1.2.2 KAPALINOVÉ LASERY	15
1.2.3 PLYNOVÉ LASERY	16
1.2.4 POLOVODIČOVÉ LASERY	17
1.3 VYUŽITÍ LASERŮ	18
1.3.1 LASEROVÁ TECHNOLOGIE V MEDICÍNĚ	18
1.3.2 LASEROVÁ TECHNOLOGIE V PRŮMYSLU.....	19
1.3.3 HOLOGRAMY	21
1.3.4 DALŠÍ APLIKACE LASERŮ	22
2 APLIKACE LASERU NA TEXTILNÍ MATERIÁLY	23
2.1 PŮSOBNÍ LASERU NA POLYESTEROVÁ VLÁKNA	23
2.2 PŮSOBNÍ LASERU NA BAVLNĚNÉ TEXTILIE	24
2.3 LASEROVÉ ŘEZÁNÍ TEXTILU	25
2.4 GRAVÍROVÁNÍ TEXTILNÍCH MATERIÁLŮ	26
2.5 TISK TEXTILÍ LASEREM	27
2.6 LASEROVÉ ČIŠTĚNÍ ARCHEOLOGICKÝCH TEXTILÍ	28
2.7 LASEROVÁ DIFRAKTOGRAFIE.....	29
3 POUŽITÍ LASERU V ODĚVNÍM DESIGNU	30
3.1 MÓDNÍ NÁVRHÁŘSTVÍ POMOCÍ LASEROVÉ TECHNOLOGIE	30
4 VLASOVÉ TEXTILIE	35
4.1 VLASOVÉ TKANINY	36
4.1.1 ÚTKOVÝ SAMET	36
4.1.2 MANŠESTR.....	37

4.1.3	OSNOVNÍ SAMETY A PLYŠE	38
5	POPIS EXPERIMENTU	40
5.1	LASER	40
5.1.1	TECHNICKÉ PARAMETRY LASERU	41
5.1.2	PARAMETRY LASEROVÉHO SVAZKU PAPERŮ	41
5.1.3	SOFTWARE (PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ) LASERU	41
5.2	TEXTILNÍ MATERIÁL	42
5.3	KONSTRUKCE ÚHLOVÉHO STOLKU	42
5.3.1	FIXACE VZORKU NA STOLEK	43
5.4	PŮSOBNÍ LASERU NA TEXTILNÍ MATERIÁL	44
6	METODY EXPERIMENTU	45
6.1	OZÁŘOVÁNÍ MATERIÁLU	45
6.2	SNÍMÁNÍ OZÁŘENÝCH VZORKŮ	46
6.3	OBRAZOVÁ ANALÝZA	47
6.4	PEVNOST TEXTILIE	48
6.5	RASTROVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE	48
6.6	POČÍTAČOVÁ TOMOGRAFIE	49
7	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTŮ	50
7.1	PŮSOBNÍ LASERU NA MATERIÁL PŘI RŮZNÉ DÉLCE PULZU	50
7.1.1	OBRAZOVÁ ANALÝZA	51
7.1.2	PEVNOST MATERIÁLU	55
7.1.3	RASTROVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE	56
7.2	VZOROVÁNÍ VLASOVÝCH MATERIÁLŮ	60
7.3	PŮSOBNÍ LASERU NA MATERIÁL POD RŮZNÝMI ÚHLY	61
7.3.1	PEVNOST MATERIÁLU	61
7.3.2	RASTROVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE	62
7.3.3	POČÍTAČOVÁ TOMOGRAFIE	65
	ZÁVĚR	68
	SEZNAM OBRÁZKŮ	69

SEZNAM TABULEK	71
SEZNAM GRAFŮ	71
LITERATURA	72
PŘÍLOHA	76

Úvod

V současné době má laserová technologie velké zastoupení v různých oborech, přesto je však pojem laser pro mnohé známkou něčeho nového. I když si to nepřipouštíme, tak s lasery a s nimi související produkty se setkáváme takřka na každém kroku. Laserový paprsek se stal nenahraditelný jak ve strojním průmyslu, tak v lékařství či v komerční elektronice v podobě například tiskáren, počítačů nebo DVD přehrávačů.

V textilním průmyslu se můžeme setkat se spojováním materiálu pomocí laserového spoje, s oddělováním textilií laserovým řezáním nebo laserovým gravírováním a rytím na oděvní materiál. Také se pomocí laserového paprsku upravuje drobná příprava v podobě zdobení plastových knoflíků. Přesto že laser má pro textilní průmysl velké využití, pravdou je že to není běžné zařízení, které bychom mohli najít v každém textilním podniku, díky jeho vysokým finančním nákladům.

Zvýšená poptávka po laserové technologii není jen u technické oblasti, ale i u špičkových návrhářů. Hlavním důvodem je šetrné zpracování textilních materiálů a přesnost vypalování i těch nejsložitějších tvarů. Proto přichází do módy jak v oděvním tak v bytovém designu.

Laserovým paprskem se dají textilní materiály také vzorovat a tak se docílí nového vzhledu textilie. Většinou se vzor vytvoří změnou barevnosti materiálu po působení laserového záření nebo celkového odstranění barviva z textilie.

Úkolem diplomové práce bylo vytvořit novou technologií úpravy vlasových textilií pomocí infračerveného záření a docílit zajímavého vzhledu textilie. Materiál s vlasem byl vybrán z toho důvodů, že při působení laserového paprsku na textilií se vytvoří jemný reliéf způsobený zkrácením vlasu. Z designového hlediska je výsledný efekt velmi zajímavý. Pro zjištění jak moc poškozuje laserové záření textilní materiál, se provedly vybrané zkoušky.

TEORETICKÁ ČÁST

1 Laserová technologie

Laser patří k nevýznamnějším technickým objevům druhé poloviny dvacátého století. Název vynálezu vychází z počátečních písmen anglického slova Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation a vymyslel ho americký fyzik Gordon Gould, tedy zesílení světla pomocí stimulované emise záření [1].

Definice uvádí, že laser je kvantový generátor a zesilovač koherentního optického záření, které vyniká extrémní monochromaticností (všechny fotony mají stejnou vlnovou délku a frekvenci), nízkou rozbíhavostí svazku a vysokou hustotou přenášeného výkonu či energie. Tyto vlastnosti odlišují laserové záření od všech ostatních záření. Také se dá říct, že laser je zdroj světla zaměřený na značně malou plochu, na kterou soustředí vysoké množství energie, čímž dochází ke změnám povrchu bez přímého kontaktu s materiálem [2].

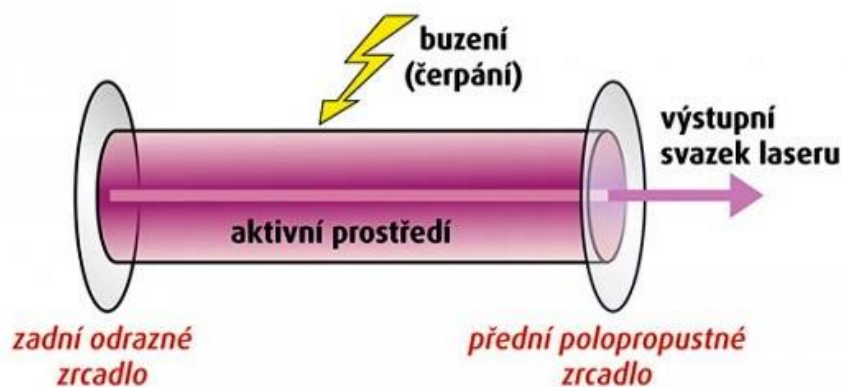
1.1 Fyzikální princip

Existuje mnoho různých typů laserových generátorů, avšak každý obsahuje tři základní součásti: *laserové aktivní prostředí*, ve kterém probíhá zesilování záření, *zdroj* čerpání pro nabuzení aktivního prostředí a *rezonátor* vytvářející zpětnou vazbu mezi aktivním prostředím a zářením, které vede ke vzniku laserových oscilací.

Laserové světlo vzniká stimulovanou emisí díky určitému podnětu. V laseru je obsažen zdroj, který vyzařuje světlo s obrovským počtem atomů. Tyto atomy se v aktivním prostředí dostanou do vybuzeného stavu a je nutné, aby v něm setrvaly dostatečně dlouhou dobu. Tomuto stavu se říká, že jsou atomy na metastabilní hladině. U prvního laseru zdroj představoval krystal rubínu a atomy budila výbojka. Dnes se využívá jako aktivní prostředí nepřeberné množství látek všech skupenství.

Ke vzniku laserového paprsku je v první řadě zapotřebí výbojka (zdroj). Díky jejímu záblesku přejdou atomy ze základního stavu přes přechodový stav do stavu metastabilní hladiny. Jakmile se vytvoří stimulující foton červeného světla, všechny vybuzené atomy se vrací do základního stavu, přičemž vyzařují přebytečné množství získané energie ve formě fotonů. K zesílení světla dochází, když do aktivního prostředí, z kterého vystupují fotony, vnikne další stimulující foton.

K tomu aby se fotony uvnitř aktivního prostředí udržely dostatečně dlouho k nahromadění co nejvíce energie, je zapotřebí optický rezonátor se dvěma zrcadly. Jedno je postříbřené a tvoří nepropustné neboli odrážející zrcadlo, druhé je polopropustné. Fotony vznikající stimulovanou emisí se odrážejí od zrcadel a nabírají dostatečné množství energie, díky které intenzita světla uvnitř rezonátoru postupně narůstá. Po dosažení určité hodnoty energie světelný impulz vyjde skrz polopropustné zrcadlo a tím se vytvoří laserový paprsek. Po vyzáření fotonů se atomy vrací zpět do původního stavu a po záblesku výbojky se děj opakuje. Princip laserového záření je znázorněn na obrázku 1 [3][4].



Obrázek 1: *Princip laseru [5]*

1.2 Typy Laserů

V současné době existuje mnoho různých tříd laserů. Základní princip je u všech stejný, liší se hlavně svou konstrukcí, poskytovaným výkonem, účinností i charakterem výstupního svazku. Dělení laserů do jednotlivých skupin probíhá podle několika kritérií. Nejčastěji se dělí podle aktivního prostředí a to na pevnolátkové, kapalinové, plynové, plazmatické a polovodičové – laserové diody. Další kategorií je dělení laserů podle délky výstupního svazku na kontinuální a pulsní. Způsob čerpání energie rozděluje lasery na opticky čerpané (koherentně nebo nekoherentně), lasery čerpané elektrickým výbojem, chemickou reakcí, elektronovým svazkem a podobně. Lasery můžeme také rozčlenit podle vlnové délky na lasery pracující v UV oblasti (pod 380 nm), ve viditelném spektru (380 – 760 nm) a v oblasti infračerveného záření pracující s vlnovou délkou vyšší než 760 nm [2].

1.2.1 Pevnolátkové lasery

Pevnolátkové lasery se především uplatňují v medicíně, ve vědě a v průmyslu. Používají se převážně pro řezání, svařování a 2D nebo 3D opracování. Aktivní prostředí tvoří matrice – krystalické nebo amorfní (sklo, keramika) izolanty, dopovaná příměsí vhodných iontů. Pevnolátkové lasery jsou schopny pracovat ve všech možných režimech, jsou velmi flexibilní a vyzařované vlnové délky pokrývají viditelnou a infračervenou oblast spektra. Velká výhoda oproti jiným typům spočívá v robustnosti, v stabilitě a v malých nárocích na údržbu a provozní podmínky.

Nejznámějším představitelem této kategorie je rubínový laser, který za aktivní prostředí využívá krystal syntetického rubínu. Tento laser produkuje světlo ve dvou vlnových délkách (692,9 nm 694,3 nm) které vyzařují červené světlo a převážně funguje v pulsním režimu.

Nejrozšířenějším a dnes asi nejlépe technicky zvládnutým pevnolátkovým laserem je laser označovaný jako Nd:YAG. Jeho aktivní prostředí využívá krystal yttrium-hlinitého granátu zásobovaného atomy neodymu. Tento laser generuje neviditelné infračervené záření o vlnové délce 1064 nm, avšak s pomocí nelineární

optiky se často využívá při záření zeleného světla. Pevnolátkových laserů je ovšem daleko více jak znázorňuje tabulka 1 [2].

Tabulka 1: *Pevnolátkové lasery [6]*

Typ laseru	Aktivní prostředí	Vlnová délka	Spektrální oblast	Příklady použití
Rubínový laser	$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$	694,3 nm	červená	holografie, odstraňování tetování
Nd:YAG laser	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$	1064,1 nm	IR	litografie, chirurgie, strojírenství, spektroskopie
Ho:YAG laser	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ho}^{3+}$	2,1 μm	IR	chirurgie, stomatologie
Er:YAG laser	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Er}^{3+}$	1,56 a 2,94 μm	IR	dálkoměry, chirurgie, stomatologie
Yb:YAG laser	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Yb}^{3+}$	1,029 μm	IR	strojírenství, svařování, řezání
Titan-safírový laser	Ti, Al_2O_3	690 - 1000 nm	červená, IR	spektroskopie
Alexandrovitý laser	$\text{Al}_2\text{BeO}_4:\text{Cr}^{3+}$	700 - 818 nm	červená, IR	žihání, řezání
Neodýmový laser	$\text{SiO}_2:\text{Nd}_2\text{O}_5$	1,0623 μm	červená, IR	vysoce-energetické pulzní systémy
Nd:YLF laser	LiYF_4	1053 nm	červená, IR	průmyslové aplikace, lékařství

1.2.2 Kapalinové lasery

Kapalinové lasery se nejvíce využívají ve spektroskopii a v informační technice. Aktivním prostředím těchto laserů jsou opticky buzené roztoky organických barviv. Výhodou těchto laserů je jejich laditelnost – mohou zářit na více vlnových délkách. Zvolené barvivo ovlivňuje spektrum vyzářeného světla např.: Polymethinová barviva generují záření červené až infračervené oblasti (700-1500 nm), xanthenová barviva pracují ve viditelném spektru (400-500 nm) a scintilátorová barviva v ultrafialové části spektra (< 400 nm). Nevýhodou těchto laserů je krátká životnost aktivního prostředí, které se účinkem tepla a světla rozkládá.

Mezi nejznámější zastupitele této skupiny patří rhodamonový laser, který generuje pulsní záření od červené po zelenou oblast spektra jak je znázorněné v tabulce 2 [7].

Tabulka 2: *Kapalinové lasery [6]*

Typ laseru	Aktivní prostředí	Vlnová délka	Spektrální oblast	Příklady použití
Rhodamin 6G laser	$C_{28}H_{31}N_2O_3Cl$	570-650 nm	žlutá, oranžová, červená	dermatologie
Kumarin C30 laser	$C_9H_6O_2$	504 nm	zelená	oftalmologie, chirurgie

1.2.3 Plynové lasery

Plynové lasery nachází uplatnění v mnoha různých oborech od geodezie, medicíny až po průmysl. Aktivní prostředí těchto laserů je ve formě směsí plynů jako CO_2 , He nebo N a to v odlišných poměrech podle účelu použití. Nezbytnou součástí je chladicí médium, na které se využívají různé roztoky jako je například voda, olej apod. Plynové lasery pracují v různé spektrální oblasti v kontinuálním nebo pulsním režimu. Pro buzení se používá široká škála fyzikálních a fyzikálně - chemických procesů. Laserový paprsek má velice dobrou homogenitu a nepatrnou rozbíhavost svazku. Hlavní výhodou těchto laserů je jejich značná účinnost. Naopak mezi nevýhody patří jejich malý výkon, který se získává z jednotky objemu aktivního prostředí. Proto jsou výkonné plynové lasery značně rozměrné.

K nejrozšířenějším typům patří červeně zářící helium – neonový laser, světelné efekty poskytuje například modře a zeleně zářící laser argonový. V medicíně a průmyslu se nejvíce vyskytuje infračervený laser CO_2 . Zvláštním typem plynových laserů jsou lasery excimerové, které jsou výkonným zdrojem ultrafialového záření. Další přehled těchto laserů a jejich vlnové délky jsou zaznamenány v tabulce 3 [2].

Tabulka 3: Plynové lasery [2]

Typ laseru	Aktivní prostředí	Vlnová délka	Spektrální oblast	Příklady použití
Plynové - atomární				
He-Ne laser	He, Ne	543 nm, 633 nm	zelená, červená	zaměřování polohy
Měděný laser	Cu	510 nm, 578 nm	zelená	podmořská komunikace a lokace
Jodový laser	I	342 nm, 612 nm, 1315 nm	UV, viditelné, IR	věda, termojaderná syntéza
Plynové - iontové				
Argonový laser	Ar	488 nm, 514 nm	modrá, zelená	oftalmologie, spektroskopie
Plynové - molekulární				
CO ₂ laser	CO ₂	10,6 μm	IR	sváření, řezání, stomatologie, gravírování
CO laser	CO	5 - 6,5 μm	IR	
Excimerové lasery	ArF, KrCl, KrF, XeCl, XeF	193 - 351 nm	UV	oftalmologie, laserová ablace, fotolitografie

1.2.4 Polovodičové lasery

Polovodičové lasery patří v dnešní době mezi nejpoužívanější lasery. Uplatňují se zejména v telekomunikacích, ve výpočetní technice nebo v medicíně. Aktivním prostředím je elektricky čerpaná dioda, u které se dá výkon snadno měnit změnou elektrického proudu. Laserový paprsek září v mnoha barvách spektra a to od blízké ultrafialové do vzdálené infračervené oblast. Tyto lasery se využívají jak v kontinuálním tak v pulsním režimu, vyznačují se vysokou účinností a vyrábějí se v různých se výkonech. Polovodičové lasery mají malé rozměry, což je na jedné straně jejich výhoda, ale na druhé straně je jejich paprsek rozbíhavější než u jiných typů laserů. Typy polovodičových laserů jsou uvedeny v tabulce 4 [3].

Tabulka 4: Polovodičové lasery [6]

Typ laseru	Aktivní prostředí	Vlnová délka	Spektrální oblast	Příklady použití
GaAs laser	GaAs	650 nm, 840 nm	červená, IR	laserová ukazovátka, laserová tiskárna
GaAlAs laser	GaAlAs	670-830 nm	červená	telekomunikace, přehrávače CD, displeje
AlGaInP laser	AlGaInP	650 nm	červená	přehrávače DVD
GaN laser	GaN	405 nm	modrá	Blu-ray disky
InGaAlP laser	InGaAlP	630-685 nm	červená	lékařství

1.3 Využití laserů

Laserová technologie má v dnešní době velké zastoupení v různých oborech. V této kapitole je cílem informovat o pestrosti použití laserů a upozornit také na fakt, že se s lasery a s nimi souvisejícími produkty setkáváme takřka na každém kroku.

1.3.1 Laserová technologie v medicíně

Pro specifické vlastnosti laserového světla je využití záření v dnešní medicíně velmi široké, a jeho aplikace stále přibývají. Pro lékaře je nejdůležitější možnost koncentrace energie záření na malé ploše, tato energie se v tkáních pohlcuje a mění na teplo. Proto má laser významné postavení především v chirurgii. Operace laserovým zářením jsou bezdotykové a jejich výsledkem je ostře ohraničený řez tkání bez poškození okolí. Současně s řezem a teplem dochází v tkáni k uzavření konce cév, takže rána mnohem méně krvácí. Po laserové chirurgii se rána hojí rychleji a bolest je značně omezená.

V očním lékařství se laserovým zářením může spravit odchlípená oční sítnice, odstraňuje se zelený zákal, léčí se postižení sítnice při cukrovce a především se aplikace laseru využívá pro operace očních vad jako je krátkozrakost a dalekozrakost.

Velmi rozšířené je použití laserového paprsku v dermatologii a kosmetických salonech. Laserové záření řízené počítačem přesně odstraní tkáň, která je v daném místě nežádoucí. Jako jsou bradavičky, barevné skvrny, mateřské znaménka ale také popáleniny, čerstvé jizvy, modřiny, strie, tetování a další nežádoucí objekty na kůži.

Stále běžnější se stává využívání laserové technologie i v dalších medicínských oborech, jako je stomatologie, gynekologie, onkologie, urologie, angioplastika, onkologie a další. Ovšem nevyužívá se pouze k operacím a k léčení, ale je i součástí dnes nepostradatelných diagnostických zařízení, kterým je například tomograf [3].

1.3.2 Laserová technologie v průmyslu

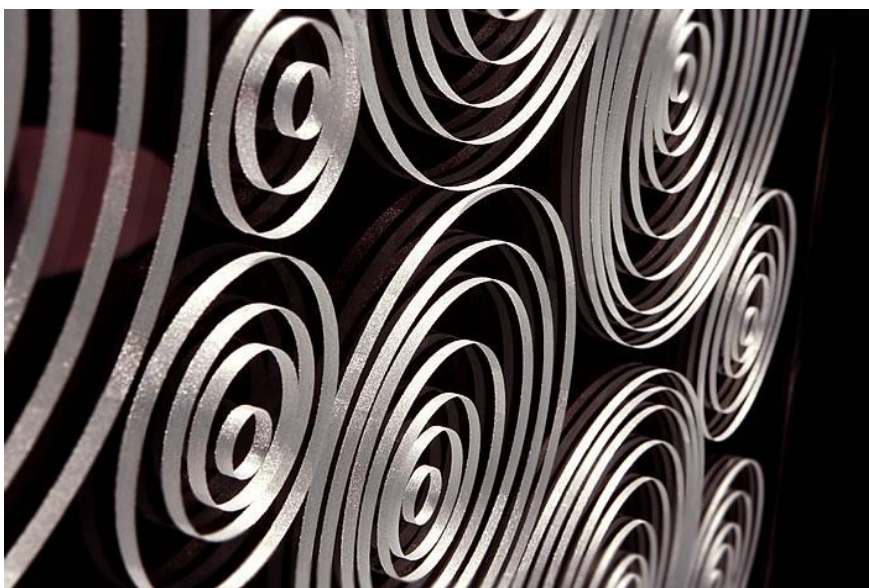
V oblasti průmyslu se rozšířily laserové technologie téměř okamžitě po sestrojení prvního laseru. Laserový paprsek je schopen působit na kovové i nekovové materiály s vysokou kvalitou a zcela novými technologickými postupy.

Velké využití laserů se nachází v obrábění materiálů neboli řezání a vrtání. Používají se především na přesné vyřezávání složitých tvarů, u kterého nevzniká téměř žádný odpad a materiály se nemusí ani upínat. Proto se dají s vysokou přesností řezat i křehké nebo snadno deformovatelné materiály, například textil. Podle počítačové předlohy se dají snadno vyřezat různé šablony a folie což zvyšuje produktivitu práce v reklamním průmyslu.

Další příkladem využití laserového paprsku v průmyslu je svařování. Svařování laserem dochází k tepelnému působení paprsku jen lokálně, takže nedochází k tepelnému poškození okolí svařovaného místa. Proto je toto svařování v mnoha případech výhodnější než použití klasické technologie. Výhodou laserového svařování je absence kontaktu materiálu s elektrodou, rychlé chladnutí, svařování nesoudržných materiálů (kov-plast, kov-keramika) a možnost svařování součástek s rozdílnou velikostí. Laserové svařování se využívá především k svařování plechů v automobilovém průmyslu a v letectví, kontaktů v elektronice a podobně.

Vůbec nejčastěji je laser v průmyslu využíván ke značení a gravírování kovových i nekovových materiálů. Takové značení má řadu výhod jako je mechanická odolnost, vysoký kontrast a možnost provést popisky do libovolné hloubky. Také lze vytvářet složitou grafiku nebo texty, případně čárové kódy a popisovat nepravidelné nebo zakřivené povrchy materiálů. V technických aplikacích je důležitá hlavně stálost popisu materiálů. V reklamním průmyslu se klade především důraz na grafickou kvalitu popisu.

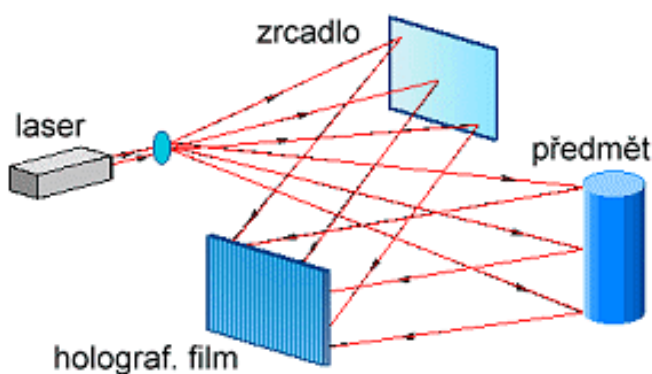
Zajímavou aplikací pomocí laserového paprsku je dekorování skleněného povrchu. V místě dopadu paprsku se částečně odpaří sklovina z povrchu předmětu. Změny teploty způsobí vznik jemných povrchových prasklin, u kterých na hranách dochází k rozptylu dopadajícího světla a předmět má v těchto místech zářivý vzhled jak je znázorněné na obrázku 2.



Obrázek 2: *Dekorace skla pomocí laseru [8]*

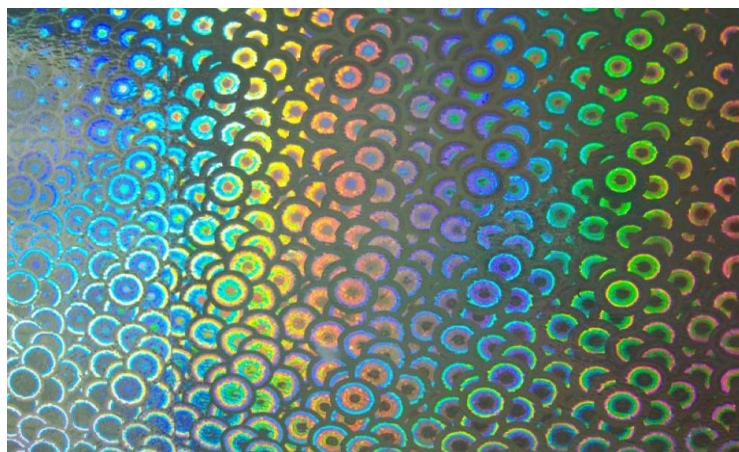
1.3.3 Hologramy

Hologram je fotografie vytvořená s pomocí laserového světla. Vidíme na ní trojrozměrný obraz předmětu tak, jak je tomu v reálné skutečnosti. Hologramy vznikají rozdělením laserového svazku na dva, jak je znázorněné na obrázku 3. První tzv. referenční svazek směřuje přímo na fotografický film, druhý nejprve dopadá na hologramový předmět a tím si poruší uspořádanou strukturu světelných vln. Film zachytí způsob, kterým je nanesený předmětový svazek, rozhází neporušený referenční svazek a vytvoří tak trojrozměrný obraz předmětu. Infračervené proužky se po osvětlení hologramu chovají jako velmi jemná optická mřížka, díky které prohlízející spatří prostorový holografický obraz, který se mění při pohledu na hologram z různých stran.



Obrázek 3: *Princip hologramu [3]*

Laserovou technologií je možné vytvářet nejen trojrozměrné obrazy, ale i různé obrazové pohybové efekty. Hustota záznamu informací (více než 1000 čar/mm) je tak vysoká, že hologramy není možno napodobit žádnou tiskařskou nebo kopírovací technikou. Proto našly největší rozšíření v oblasti ochrany proti napodobení nebo padělání. Holografické nálepky najdeme v občanském průkazu, na různých identifikačních kartách, na eurobankovkách, na obalech počítačových programů, jako umělecká díla a podobně viz obrázek 4 [3].



Obrázek 4: *Holografický papír [9]*

1.3.4 Další aplikace laserů

Díky přímočarému záření a minimální rozbíhavosti je laserový paprsek ideálním pomocníkem při zaměřování a vytyčování objektů na stavbách nebo v geodézii. Astronomové měří tímto způsobem vzdálenosti družic nebo Měsíce s přesností několika centimetrů. Dále se používá pro studium zemětřesení nebo měření vzájemného pohybu zemských kontinentů. S rozvojem polovodičových laserových diod dnes najdeme zaměřovače v profesionálních ale i spotřebitelských zařízeních jako je laserová vodováha nebo přímočará pilka se zaměřovacím paprskem pro přesné řezání. V ekologii se používají laserové radary k měření znečištění zemského ovzduší, výšky oblačnosti nebo proudění vzduchu a jeho turbulence v atmosféře.

V běžném životě se setkáváme s laserovou kopírkou nebo tiskárnou, která poskytuje velmi kvalitní výsledky při velké rychlosti tisku. Součástí osobních počítačů či notebooků jsou často optické mechaniky (CD, DVD, Blu-ray), které fungují na principu zápisu a čtení dat pomocí laserového svazku. Laser se stal běžnou součástí každodenního života a značně ulehčuje práci v mnoha oborech lidské činnosti. Přesto však v jeho potenciálním využití jsou značné rezervy [3][10].

2 Aplikace laseru na textilní materiály

Laserové záření se používá k úpravě textilních materiálů, které může zásadně ovlivnit jejich vlastnosti na povrchu textilie nebo změnu vlastností samostatných vláken. Nejčastěji se laserem upravují technická vlákna například uhlíková, čedičová, skleněná vlákna a další. Působením laseru na povrch textilních materiálů lze měnit morfologii vláken a jejich chemické i fyzikální vlastnosti.

U plošných materiálů laserové záření nejvíce působí na pevnost, která se dá ovlivnit pomocí nastavení základních parametrů laserového paprsku. Při nastavení laserového paprsku se musí dbát na další parametry jako je složení textilního materiálu, tloušťka a plošná hmotnost, které se také působením záření ovlivňují. Důležitými hodnotami pro nastavení laserového paprsku je čas expozice (pixel time) a rozlišení vypalovaného vzoru (pixel inch).

V následujících kapitolách jsou uvedeny příklady studií, které využívají laserové záření v textilním odvětví.

2.1 Působení laseru na polyesterová vlákna

V posledním desetiletí se vědci zabývali změnou vlastností textilních materiálů a povrchových úprav pomocí UV zářením, plasmou, svazkem elektronů a iontů. Jednou ze studovaných technologií je změna povrchu textilního materiálu po ozáření laserovým paprskem. Bylo prokázáno, že některé materiály jako je polymer, dřevo, kov, křemen a podobně působením laserového záření změní v povrchu své fyzikální a chemické vlastnosti. Proto se ve studii C.W. Kan [11] zabýval změnou vlastností polyesterových vláken po laserové úpravě.

Polyesterová vlákna se vyznačují vysokou odolností na světle a malou navlhavostí. Vlastnosti těchto vláken se dají snadno zlepšit chemickými nebo mechanickými procesy. V testu se materiál ozařoval excimerovým laserem (KrF) o vlnové délce 248 nm s různou intenzitou. U ozářených vzorků se prováděly zkoušky na pevnost a tažnost, smáčení, prodyšnost, lesk povrchu a oděr. Dokázalo se, že laserové záření nemá vliv na vnitřní strukturu polyesterových vláken díky nízké hloubce průniku.

U povrchových vlastností se zvýšila prodyšnost a smáčivost, která je dobrá pro oděvy na běžné nošení avšak pro funkční nepromokavé oděvy se nehodí. Proto působení laserového paprsku na polyesterový materiál je vhodný, ale jen za předpokladu, že víme, jaký bude konečný výrobek.

2.2 Působení laseru na bavlněné textilie

Laserové záření se využívá jako náhradní úprava povrchu materiálů místo tradičně chemického zpracování. Díky této technologii se můžou významně snížit náklady na energii, chemikálie, spotřebu vody a nezatěžuje se životní prostředí. CO₂ laserové záření modifikuje vlastnosti a povrch především syntetických materiálů, proto se začal zkoumat vliv laserového záření také na bavlně.

Při ozařování bavlněného textilního materiálu laserem se musí pečlivě nastavit dva základní parametry laserového paprsku. Prvním je rozlišení, které se značí dpi (dots per inch = počet bodů na jednotku palce, což je 2,54 cm), a představuje intenzitu laseru při dopadu na určité místo materiálu (výkon na plochu W.cm⁻²). Druhý parametr je délka pulzu, značí se μ s, a představuje čas, potřebný pro vytvoření jednoho laserového bodu, za který se laserový paprsek dostane na polohu bodu u každého obrazového bodu. Delší časová expozice působí větší energií, což vede k větší míře vypalování.

Podle studie [12] se použil na bavlněnou tkaninu CO₂ laser s různým rozlišením a různou časovou expozicí. Upravené vzorky byly následně barveny přímými barvivy pro zjištění jaký vliv má laserové záření na barevnost textilie. Přímá barviva byla použita pro jejich snadné barvení, aplikaci, dobrou rozpustnost ve vodě a pro dobré stálosti na světle.

Po působení laseru na bavlněnou tkaninu vznikají na vláknech prasklinky a trhliny, které vytváří novou strukturu bavlněného vlákna a to tzv. houbu. Tato struktura má vliv na ztrátu pevnosti a vyblednutí barvy u bavlněného materiálu. Po ozáření má také tkanina sklon ke žloutnutí na svém povrchu, které je způsobeno oxidací kvůli odstranění karboxylových skupin. Tento efekt však nebyl významný.

Čím větší byl čas expozice a rozlišení, tím výraznější byly obrazy rytí na vzorcích. Následkem bylo snížení pevnosti materiálu, který se začal trhat. Výsledky také ukázaly, že vzorky ozářené laserem po barvení byly světlejší než původní vzorky. Efekt je způsobený vyšší odrazivostí světla, které ovlivňuje schopnost pohlcovat barviva [12].

2.3 Laserové řezání textilu

Laserové řezání textilu je bezkontaktní metoda, která umožňuje velmi rychlé a maximálně přesné vyřezávání i těch nejjemnějších tvarů a ornamentů bez nutnosti materiál upínat viz obrázek 5. Můžou se řezat jak kompletní střihy, tak jednotlivé dílce střihů, které je těžké zhotovit (např. otvory uvnitř střihů). U materiálů s umělými vlákny dochází k fixaci okraje řezu, což může být i výhodou. U přírodních vláken jako je bavlna či len dochází při řezu laserem k hnědému zabarvení hrany. Tento jev se dá kompenzovat správným nastavením parametrů laseru.

Jestliže materiál obsahuje termoplastická vlákna, tak při oddělování textilií ve vrstvách hrozí spojení jednotlivých vrstev materiálů. V dnešní době se tento problém řeší pomocí prokládání jednotlivých vrstev papírem, který zabraňuje v jejich spojení. Pro vyšší účinnost oddělování textilií je důležité, aby došlo k rychlému odpaření vlákenného materiálu [13].



Obrázek 5: *Laserové řezání textilu [14]*

V studii P. Bamforth, K. Williams a M.R. Jackson [15] se zabývali náhradním řezáním nylonové krajky, která se používá na spodní prádlo. U mechanické metody je nevýhodou omezená rychlost a časté broušení kotoučů, díky kterému dochází k narušení krajky. Také se nedají na řezacích strojích řezat krajky se složitým vzorem, proto se vyžaduje úprava k ručním stříháním.

Alternativou těchto strojů je řezání krajky pomocí laserového paprsku. Hlavní výhodou použití laseru je velice přesný řez, který neporuší okolí textilie. Ovšem díky teplu, které laserový paprsek vyzařuje, se okraj zpevní a jeho hrana zataví, což snižuje komfortní vlastnosti materiálu.

Z těchto důvodů v této studii použili pulsní laserový řezací stroj, u kterého by se tyto nežádoucí vlastnosti krajky nevyskytovaly. Délka působení laseru při jednotlivých pulsech byla minimální tak, aby se zajistil malý relativní pohyb mezi laserem a pohybujícím se vzorem. Konečné výsledky dokazují, že kvalita okraje krajky se použitím pulsního procesu řezání výrazně zlepšila, ale stále nevykazuje takové výsledky jako při mechanickém oddělování.

2.4 Gravírování textilních materiálů

Laserové gravírování je proces, při kterém dochází ke vzorování nebo značení materiálu. Vzor na textilií vzniká tepelným působením laserového paprsku, díky kterému je přesný a trvanlivý. Na rozdíl od značení tiskem, leptáním či bělením je laserové gravírování ekologické. Laserové vzory díky vysoké kvalitě předčí tradiční tisk a také mají výborné barevné stálosti. Zároveň u této technologie odpadá složitý proces praní a sušení.

V současné době se blednutí denimu provádí pomocí vícestupňového praní, při kterém se využívá velké množství vody, různé chemikálie a mechanické přísady (např. kameny, golfové míčky apod.), které působí na látku k vytvoření požadovaného vzoru. Další metodou pro vytváření vzoru na denimu je bělení pomocí chemických látek. Navíc voda používaná v těchto procesech je kontaminovaná barvivou a dalšími chemickými látkami, proto vyžaduje čištění před vypuštěním, které se provádí velmi málo, a tak znečištěná odpadní voda je vypuštěna do životního prostředí.

Z těchto důvodů se v mnoha studiích zabývali vytvořením „bledého“ vzoru na denimu ozářením textilie laserovým paprskem. Nejdůležitější je v této technologii nastavení parametrů laserového záření, které ovlivňují konečný výsledek materiálu. Jedná se hlavně o intenzitu laserového paprsku (μs).

Při působení laseru na tkaninu se odstraní z povrchu vlákénka, což způsobí změny v omaku textilie. Barevnou změnu tkaniny způsobuje odpaření barviva, v případě denimových tkanin je to indigo. V místě kde působí laserový paprsek, dochází k blednutí džínové tkaniny, a tím pádem také ke snížení množství barviva v materiálu. Ze studie Chi-wai Kan [16] vyplývá, že zvyšováním výkonu laseru dochází k většímu blednutí denimu a z toho tedy plyne snížený obsah indiga v tkanině po úpravě laserem. Tato teorie se potvrdila i v článku od C. W. Kan, C.W.M Yuen a C.W Cheng [17].

Výsledkem obou studií je, že působením CO_2 laseru na denim se vytvoří lepší barevný efekt než klasickou technologií pomocí metody stone-wash. Také po porovnání laserové technologie s klasickým způsobem zpracování denimu bylo prokázáno, že ozáření laserem ušetří energii, čas a nezatěžuje se životní prostředí. Závěrem lze konstatovat, že laserové gravírování denimu je výhodnější pro textilní průmysl než klasická technologie.

2.5 Tisk textilií laserem

Ve studii [18] se autor A. T. Ozguney zabýval porovnáním kvality výrobku získaného vzorováním pomocí pigmentového tisku a vzorováním pomocí CO_2 laseru.

Technologie pigmentového tisku se v dnešní době využívá na více jak 50% potiskování textilií. Pigmentový tisk je jednoduchý, má nízké výrobní náklady a není nutné praní po tisku. Nevýhodou této metody je doba tisku, snížení reprodukovatelnosti kvůli přípravě pasty, ucpání síta a podobně.

Bylo připraveno 40 kusů džínových kalhot, na které byl vytvořen stejný vzor. Na polovinu kalhot se vzor vypálil pomocí laserového paprsku a na druhou polovinu se tisknul ručně pigmentem. Upravené vzorky se testovaly v pevnosti tahu a ve stálostech suchého a mokrého otěru.

Ukázalo se, že laserová metoda je rychlejší než pigmentový tisk, pokud jde o celkový čas aplikace návrhu na denim. U obou technologií nedošlo k žádnému významnému rozdílu mezi hodnotami v pevnosti v tahu. Závěrem tedy je, že v průběhu procesu nedošlo ani u jedné metody k poškození tkaniny.

Laserové vzorky mají lepší stálosti v otěru ve srovnání s pigmentovým tiskem. Další výhodou laserového tisku je dobrá opakovatelnost vzorů. Také laserová technologie nevyžaduje další postupy jako je sušení a fixace materiálu, které zvyšují čas a náklady výroby. Výsledky této práce ukazují, že proces vzorování laserem je velkou konkurencí pro technologii pigmentového tisku.

2.6 Laserové čištění archeologických textilií

Čištění vyšíváných vzorů na archeologických textiliích bývá velmi složitý proces, kvůli zachování původního vzhledu materiálu. Textilní restaurátoři se domnívají, že tradiční metody čištění více materiál poškodí, než očistí.

Studie Omar A. K. a Harith M. A. [19] si klade za cíl porovnat laserové čištění s metodou čištění za mokra na archeologické egyptské textiliích bez poškození organických vláken. Předpokládalo se, že laser je slibnou čistící technikou pro záchranu uměleckých děl díky schopnostem odstranit povrchové nečistoty přesně, vrstvu po vrstvě a jen v místě, které to vyžaduje.

Laser působil na zkorodované výšivky vlnovou délkou 532 nm. Připravené vzorky se hodnotily světelným mikroskopem a rastrovacím elektronovým mikroskopem. Výsledky ukazují, že laserové čištění je nejúčinnější metodou pro čištění zkorodovaných měděných nití což je znázorněné na obrázku 6. To lze bezpečně používat při odstranění koroze bez poškození kovových pásků a vláknitého jádra, protože poskytuje dobrou kontrolu. Vysoká kontrola umožňuje zachování detailu na povrchu materiálu jako je například reliéf nebo originální značení materiálu.



Obrázek 6: *Výšivka před a po působení laserového záření [19]*

2.7 Laserová difraktografie

Technologie difraktografie se využívá k určování strukturních parametrů textilií jako je součinitel orientace vláken, stupeň anizotropie a dokonalost struktury síťových tkanin. Tato technika je podobná rentgenové difrakci na krystalech a amorfních látkách. Rentgenové záření odpovídá záření He – Ne laseru (helium – neonový laser) o vlnové délce 633 nm. Krystalovou mřížku nahrazuje dvojrozměrná mřížka tkanin a rovn. Teorie difrakce na textilních strukturách je mnohem složitější než dnes již podrobně zpracované teorie difrakce na kondenzovaných látkách.

Laserová difrakce využívá absorpci a odrazivost laserového záření textilií pro zjištění kvality textilního materiálu. Principem difrakce na textilní struktuře jsou vytyčené dva rovnoběžné paprsky. Jeden prochází počátkem textilie a druhý z jeho směru dopadá na určenou plošku. Vlivem difrakce dojde k odchýlení paprsků od původního směru pod úhlem 20° . Metoda laserové difrakce je nenahraditelná k určování stupně orientace vláken v rounech, netkaných textiliích, usních, v pásčích při rotorovém předení. V současné době ji lze provádět v reálném čase za pomoci připojení digitální videokamery.

Také se používá u špatně rozeznatelné tkaniny pro stanovení osnovy a útku. Metody difrakce umožňují kontrolu kolmosti osnovních a útkových nití, která je důležitou vlastností textilie. Ve výrobním procesu difrakce umožňuje sledovat produkci tkaniny. Využívá se zejména u textilií určené pro tisk a sítotisk [20][21].

3 Použití laseru v oděvním designu

V současné době poptávka po laserové technologii roste nejen v technické oblasti, ale i u špičkových návrhářů. Při zpracování textilních materiálů laserem odpadají problémy, jako je třepení materiálu, proto přichází do módy jak v oděvním designu, tak v bytovém. V oděvním designu se především využívá díky svým přednostem ve vypalování složitých a přesných tvarů, variabilitou jejich velikosti a možnost stálého opakování.

Další výhoda laseru je při oddělovacím procesu, kde dokáže vyřezat i ty nejmenší díly a součásti oděvů. Při klasickém stříhání nůžkami bývají velké problémy s třepením materiálu a s přesností. Při použití laseru toto vše odpadá, a to i u velmi jemných textilních materiálů jako je šifon. U řezání více vrstev se díky laseru může stále opakovat jeden vzor bez nějaké deformace tvaru, s přesností a s minimální ztrátou materiálu. Díky všem výhodám využití laserové technologie se otevírají dveře neomezeným novým technikám v oděvním designu [22].

3.1 Módní návrhářství pomocí laserové technologie

S rozvojem laserové technologie se módní průmysl zaměřuje na neobvyklé vzory a zdobení textilního materiálu. Ty můžou vzniknout díky laserovému gravírování, které vytváří jednoduché i složité vzory pomocí působením laserového paprsku na povrch textilie. Touto technologií se zabývali na čínské univerzitě Hong Kong Polytechnic University. Účelem této práce bylo propojit technologii s návrhem a použitím laseru vytvořit zajímavé vzory na hotové oděvní výrobky.

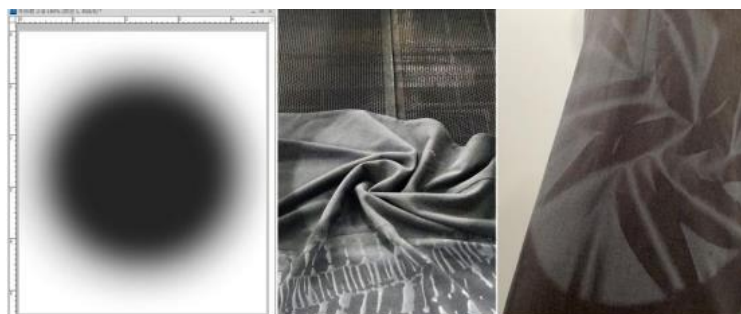
Laserem CO₂ se působilo na oděvní výrobek složený z 45 % hedvábí a 55 % polyesteru. Při vzorování se měnily parametry laseru jako je čas expozice (120 a 210 μ s) a jeho rozlišení (20, 30 a 40 dpi). Návrhy vzoru byly vytvořeny v softwaru Adobe Photoshop, kde se dají snadno upravovat, otáčet a převádět do různých stupňů šedi. Na obrázku 7 je znázorněný navržený vzor a jeho vytvoření na oděv pomocí laserového gravírování.



Obrázek 7: Návrh vzoru v programu Adobe Photoshop a jeho zhotovení na kalhoty [23]

Tento způsob provedení inspičuje návrháře k vytvoření nových vzorů a efektů jako je například batika. Ta se díky laseru dá vytvořit bez chemikálií a barvení, čímž se šetří životní prostředí.

Prvním způsobem se látka úmyslně zřásnila do pomyslného kruhu. Na takto připravený materiál se vypálil vzor kolečka, díky kterému se na látce, po narovnání, vytvořily zajímavé spirálové a květinové vzory, jak je znázorněno na obrázku 8.



Obrázek 8: Vypalování vzoru na zřasenou textilií [23]

Dalším postupem bylo přeložit a vytvořit sklady na látce, na kterou se vypálilo půl kolečko. Laserový paprsek působil na jen na hrany skladu a tak se vytvořil efekt, který je vidět na obrázku 9.



Obrázek 9: Vypalování vzoru na skládanou textilií [23]

Následující metodou je vázací technika, kterou se napodobuje batikování. Vzor se vytvoří pomocí zavázaných uzlíků provázkem. Výhodou laserového batikování je, že látka nemusí být tak pevně svázána jak u klasické metody, díky čemu se nevytvoří nežádoucí zmačkání textilie. Na takto připravený materiál se laserem vypálí jednoduchý vzor pruhu, který přechází z černé do šedavých odstínů.

Tato práce ukazuje, že je možné za pomoci laseru vzorovat textilní materiály nápaditě a tak vytvořit nový design použitelný pro oděvní návrhářství jak je znázorněno na obrázku 10. Tyto metody spojené s laserovým gravírováním představují velký potenciál v módním návrhářství. Musí se však dbát na parametry laseru a výběru textilního materiálu [23].



Obrázek 10: *Oděvy s laserovým vzorem [23]*

Ve studii G. X. Yuan, S. X. Jiang, E. Newton, J. Fan a W. Au [24] zkoumali působení laserového záření na povrchovou úpravu polyesterové tkaniny pro módní návrhářství. Také se sledovaly změny vlastností jako je hmotnost, tloušťka, pevnost a barevný rozdíl pomocí optického mikroskopu. Tyto zkoušky se porovnávaly na materiálu před a po působení laseru.

100% polyesterová tkanina plátnové vazby byla ozařována laserovým paprskem s vlnovou délkou 10,6 μm . Nastavení základních parametrů laserového zařízení silně ovlivňuje mechanické vlastnosti tkanin. Výsledky dokazují, že čím je časová expozice a rozlišení vzoru větší, tím hodnoty všech měřených vlastností klesají.

Také barva tkaniny působí světlejší s nažloutlým odstínem s rostoucími parametry laserového záření při gravírování.

Proto je důležité si správně určit parametry nastavení laseru při navrhování vzorů na oděv. Dále záleží na výběru softwaru, ve kterém je desénový návrh vytvořen. Ve studii se pracovalo s programem Photoshop® CS4 a formátem jpg. Zjistilo se, že nejvhodnější kombinací parametrů pro vybranou polyesterovou tkaninu je rozlišení 40 dpi s časovou expozicí 180 μs viz obrázek 11.



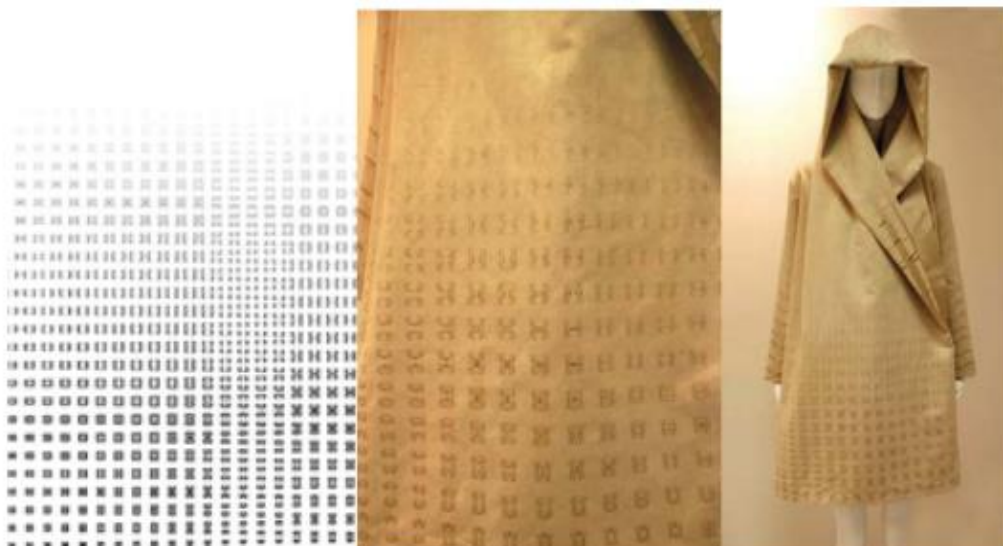
Obrázek 11: *Vypálení vzoru na polyesterovou tkaninu [24]*

Pomocí laserového gravírování lze na textilních materiálech také dosáhnout trojrozměrných vzorů jak je znázorněné na obrázku 12. Nejdůležitější je si dobře promyslet, kde má být výsledný vzor na oděvu umístěn. Při testech bylo použito rozlišení 30 dpi s časovou expozicí 180 μ s aby nedošlo k poškození tkaniny.



Obrázek 12: *Vypálení trojrozměrného vzoru [24]*

Nakonec se pomocí laserového gravírování vytvářely postupné změny barvy na různých částech oděvu. Barevný efekt se na oděvu vytvoří, když se při navrhování vzoru v softwaru použije postupného přechodu od šedavých odstínů po černou barvu jak je vidět na obrázku 13.



Obrázek 13: *Vypalování barevného efektu na oděv [24]*

Výsledky práce ukazují, že laserové vzorování je vhodné pro použití v módním návrhářství. Tato technologie nabízí spoustu různých modifikací a způsobu změny vzhledu oděvu. Díky vytvoření estetického vzhledu, který jiná technologie nedokáže, dosahuje neobvyklých módních efektů, proto je v dnešní době tak vyhledávána světovými návrháři [24].

4 Vlasové textilie

Vlasová textilie je pletenina, tkanina nebo netkaná textilie, která má na jedné nebo obou stranách odstávající vrstvu vláken či nití. Vlas se tvoří z celých nebo z řezaných smyček. Jejich délka a hustota jsou proměnlivé proto v některých případech se střídání délky a hustoty vlasu používá k vzorování textilií [25].

4.1 Vlasové tkaniny

Podstatou vlasové textilie je základní tkanina vytvořená ze dvou vzájemně kolmých navzájem provázaných soustav nití. Podélná soustava nití se nazývá osnova. Příčná soustava nití útek. Dalším důležitým prvkem vlasové tkaniny je vlas, který se základní tkaninou provazuje a je na ní kolmý. Podle toho zda je vlas na tkanině vytvořen osnovou nebo útkem, rozdělujeme vlasové tkaniny na dva druhy:

1. Samety útkové neboli manšestry
2. Samety osnovní a plyše

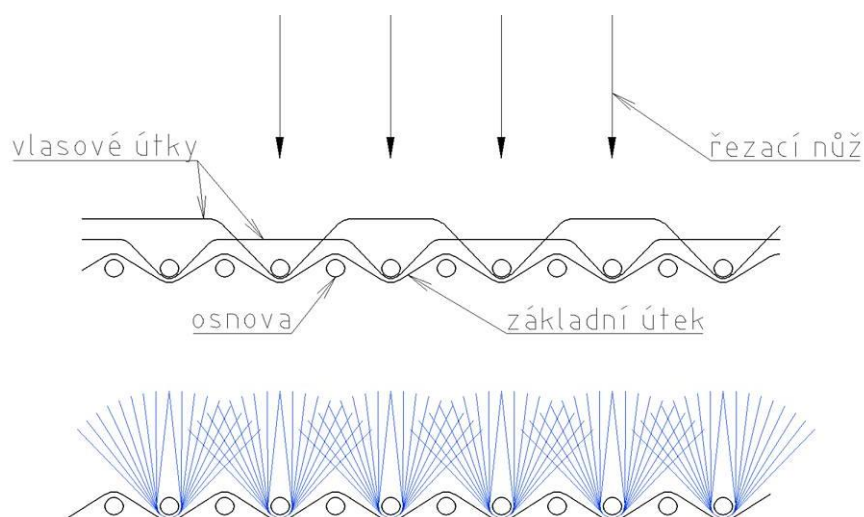
4.1.1 Útkový samet

Samet je tkanina s krátkým lesklým hustým vlasem, který sahá do výšky 1 až 2mm. Vyrábí se v jednobarevném provedení nebo s potiskem.

Útkový samet se skládá z jedné osnovy a ze základního a vlasového útku často ze stejného materiálu. Základní útek se provazuje s osnovou například ve vazbě plátňové, rypsové, v třívazném a čtyřvazném osnovním kepru nebo ve vazbě pětivazného osnovního atlasu. Vlasový útek se zachycuje buď za jednu osnovní nit, a to ve tvaru písmena V tomu se říká, že vlas je nezajištěný. Nebo na tři osnovní nitě ve tvaru dvojitého W, kdy vlas je zajištěný. Provázáním se vytvoří základní tkanina, která jde výrazně vidět na rubu materiálu, zatímco vlasový útek tvoří vlasový povrch materiálu neboli lící stranu textilie.

Poměr základních útků k vlasovým bývá 1: 1, 1: 2 až 1: 5 nebo 2: 2. Všeobecně platí, že čím požadujeme větší hustotu a vyšší vlas, tím více musí být vlasových útku na jeden útek základní a musí být jemnější. Vlasový útek může být ve střídě vazby a tedy i na tkanině různě uspořádán podle čeho rozdělujeme samety útkové na:

1. Samet hladký
2. Samet vzorovaný [26]



Obrázek 14: Příčný řez po utkání a po úpravě sametu

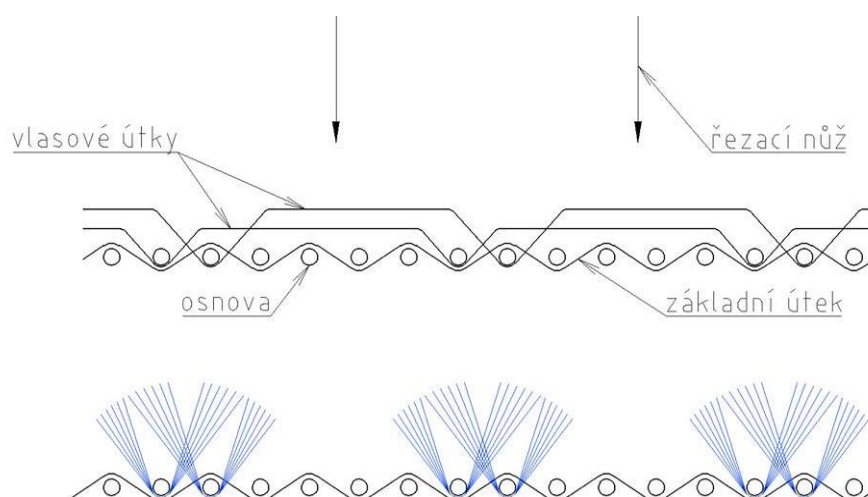
4.1.2 Manšestr

Manšestr se nazývá podle města Manchesteru, kde byl původně vyráběn. Tato bavlnářská tkanina je charakterizována svými výraznými plastickými žebry s hlubokými zářezy na líci materiálu. Tkanina se skládá z jedné osnovy a ze základního a vlasového útku. Žebra se vytvoří provázáním vlasových útků v plátňové vazbě jen se dvěma neměnicími se osnovními nitěmi. Šířka těchto vroubků je dána provázáním vlasového útku za nit vazní osnovy. Podle šířky vroubků se manšestr rozděluje:

1. Na prací kord s jemnými vroubků
2. Na manšestry se středními a hrubými vroubků

Pro lehčí manšestrové tkaniny se používá plátňová vazba, pro těžší tkaniny je nutné volit pro základní útky volnější vazbu jako je třívazný osnovní kepr, vazba cirkasová nebo dvounitné plátno.

Poměr základních útků k vlasovým je nejčastěji 1: 2 a 1: 3. Po utkání je manšestr rozřezán kotoučovými noži naráz po celé jeho šířce, jak je znázorněno na obrázku 15. Vlas se poté kartáčuje, postřihuje, napaňuje atd. [26].



Obrázek 15: Příčný řez po utkání a po úpravě manšestru

4.1.3 Osnovní samety a plyše

Samety jsou tkaniny s vlasem vysokým do 2 mm, pro tkaniny s vlasem vyšším se užívá označení plyš. Kromě výšky vlasu je také patrný rozdíl v používaných materiálech, které u sametů bývají jemnější. Ve vazební technice není mezi sametem a plyšem žádný rozdíl.

Osnovní samet se skládá ze dvou osnov, základní a vlasové, a jednoho útku, který tvoří se základní osnovou vlastní tkaninu plátňové, keprové, atlasové nebo odvozené vazby. Někdy se do základního útku přidávají speciální jehly, nad které se zvedá vlasová osnova nebo její část.

Vlasové nitě položené na jehle se proříznou, čímž se vytvoří hustý, krátký vlas. Takto zhotovený materiál se nazývá aksamit. Kromě vlasového povrchu se na tkanině může vytvořit povrch s nerozřezanými smyčkami nebo kličkami. Je také možné vyrobit samety nebo plyše, u kterých je povrch vytvořen zároveň jak vlasem, tak smyčkami. Do kategorie osnovních sametů a plyšů patří také například vlasové koberce, napodobeniny kožešin apod. [26][27].

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5 Popis experimentu

Cílem experimentální části bylo jednak vytvořit speciální úpravu vlasové textilie pomocí infračerveného záření a dále pozorovat změny struktury ozářeného vlasového materiálu.

5.1 Laser

Všechny testy probíhaly na zařízení Marcatex Flexi 150. Jedná se o CO₂ laser. Konstrukce zařízení je přizpůsobena pro řezání, svařování a rytí pro průmyslové aplikace. Jedná se o kompaktní stroj, jelikož jsou všechny prvky integrovány do jedné ovládací skříně, jak je znázorněné na obrázku 16 [28].



Obrázek 16: *Laserové zařízení Marcatex Flexi 150 [28]*

5.1.1 Technické parametry laseru

Model Marcatex 150 flexi

Průměrový výkon 150 W

Špičkový výkon 230 W

Napájení 220 V ca $\pm 10\%$ jednofázové

Vstupní napětí 200 - 240 V ca $\pm 10\%$ jednofázové

Provozní kmitočet 50 - 60 Hz $\pm 1\%$

Spotřeba Laser ZAP: 2,3 kW, 8,7 A con [28]

5.1.2 Parametry laserového svazku paprsků

M^2 (K): $< 1,2$ (> 0.8)

Rozbíhavost (divergence) paprsků $< 2,5$ mrad (celý úhel)

Elipticita paprsku $< 1,2:1$

Stabilita směru svazku 200 mrad (poloviční úhel)

Průměr svazku, $(1/e^2)$ $7,5 \pm 0,5$ mm (pro normální korekci svazku)

Vlnové délka 10,6 μm

Polarizace lineární (kolmo na základ hlavy laseru) [28]

5.1.3 Software (programové vybavení) laseru

Grafické rozhraní Windows XP

Sestavené pro práci s textovými a grafickými editory

Kompatibilní s formáty DXF, BMP, JPG

Umožňuje práci s šedou stupnicí 256

Integrace sekvenčního přehledu zpráv

Externí digitální volba

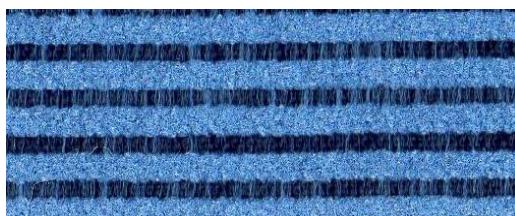
Možnost propojení s jinými systémy [28]

5.2 Textilní materiál

Širokořádkový manšestr od firmy VELVETA a.s. se sídlem ve Varnsdorfu byl vybrán pro provedené experimenty.

Společnost VELVETA a.s. je jedním z největších evropských výrobců manšestrů, sametů, dyftýnů a těžších bavlnářských tkanin. Kromě klasického sortimentu se zaměřuje na elastické výrobky, hladké tkaniny, tisky a podobně.

Vybrány manšestr je směsí 50% bavlny a 50% polyesteru, s plošnou hmotností 340 g/m^2 a tloušťkou 1,35 mm. Dostavu materiálu tvoří 29 osnovních a 39 útkových nití na jeden centimetr. Na jeden palec (2,54 cm) se přiřazuje 6 vlasových útků. Manšestr byl vybrán hlavně díky svému vzhledu a složení materiálu.



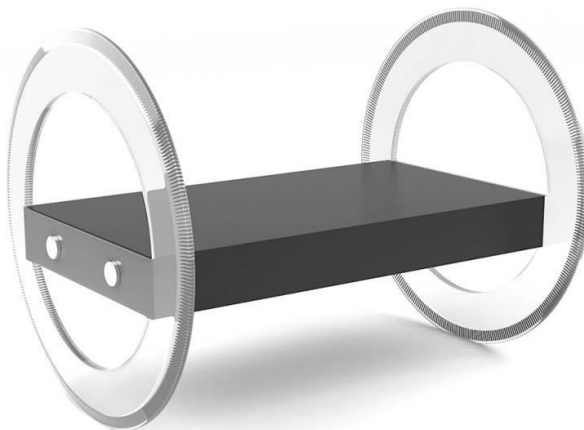
Obrázek 17: Širokořádkový manšestr

5.3 Konstrukce úhlového stolku

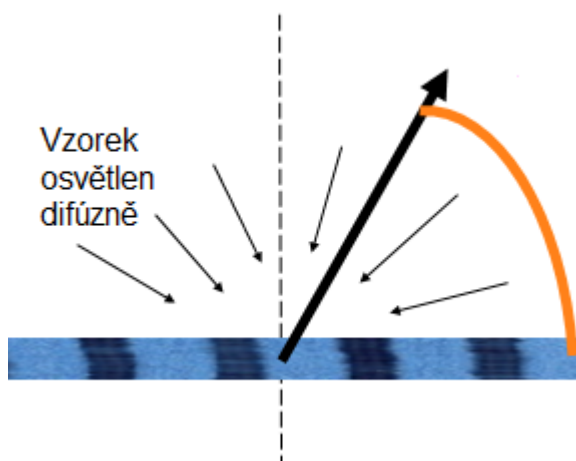
Vzorky byly měřeny nebo ozařovány pod různými úhly, proto bylo zapotřebí zhotovit v rámci diplomové práce nové měřicí zařízení.

Dva číré plastové úhloměry s měřítkem a úhlovou stupnicí od 0° do 360° se přišroubovaly z obou stran na kratší hrany vybrané desky, viz obrázek 18. Na podkladovou desku se nalepila oboustranná lepicí páska, která zabraňovala sklouznutí materiálu při ozařování laserovým paprskem pod nízkým úhlem.

Stolek s připraveným materiálem se umístil do stojanu pro lepší a přesnější nastavení úhlu. Na takto zkonstruovaném úhlovém stolku se dají nastavit úhly s přesností $\pm 0,5^\circ$.



Obrázek 18: *Úhlový stolek*



Obrázek 19: *Úhel ozařování textilního materiálu laserem*

5.3.1 Fixace vzorku na stolek

Na fixaci vzorku proti sklouznutí se použila oboustranná lepicí páska s tenkým polypropylenovým nosičem o šířce 12 mm. Tato páska je vyrobena na bázi biologického polypropylénu, transparentního lepidla s příměsí syntetického kaučuku a snímatelného silikonového papíru. Lepicí páska má dokonalou přilnavost, malou tloušťku a teplotní odolnost 60°C. Používá se pro jakékoliv povrchy a plochy, slepování, fixaci a upevňování.

Na podkladovou desku úhlového stolku se nalepily 3 stejně velké proužky oboustranné lepicí pásky. Poté byl z nich odstraněn silikonový papír, který vzápětí nahradil připravený textilní materiál. Především se dbalo nad tím, aby byl materiál na stolku fixovaný rovnoměrně.

5.4 Působení laseru na textilní materiál

Při laserovém ozařování textilního materiálu se musí dbát na správné nastavení laserového paprsku, především na intenzitu laseru a délku pulzu infračerveného záření. V experimentální části bylo zjištěno, že důležité je také umístění materiálu pod laser.

Při ozařování textilního materiálu na úhlovém stolku, který byl postaven na podkladovou desku laseru, se vzory vypálily větší, než když se materiál položil přímo na laserovou desku. Důvodem byla změna ohniskové vzdálenosti, která je znázorněna na obrázku 20. Výpočty dokazují, že čím je ohnisková vzdálenost menší, tím je větší průměr svazku paprsků. Pro srovnatelné výsledky experimentu se ozařování textilního materiálu na úhlovém stolku provádělo ve stejné úrovni laserové desky.

Vzorec:

$$B^* = b/a \cdot A^*$$

a..... Ohnisková vzdálenost [mm]

b..... 1/2 průměr svazku paprsku [mm]

A^* Vzdálenost úhlového stolku od podkladové desky laseru [mm]

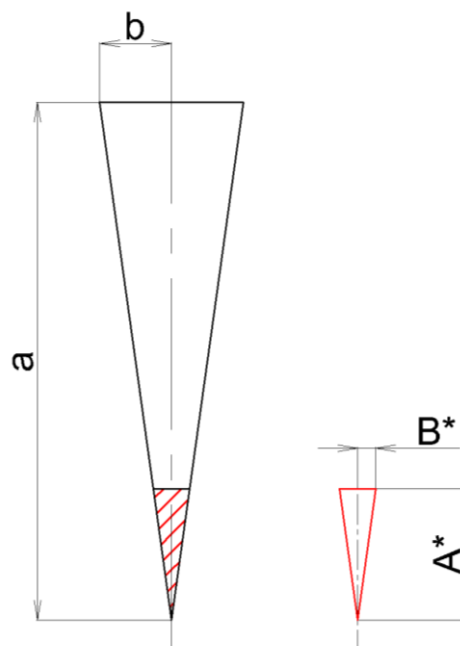
B^* 1/2 průměr svazku paprsku při ozařování materiálu na úhlovém stolku [mm]

Výpočet:

$$B^* = b/a \cdot A^*$$

$$B^* = b/a \cdot A^* = 10/1\,000 \cdot 255 = 2,25 \text{ mm}$$

$$2B = 2,25 \cdot 2 = 4,5 \text{ mm}$$



Obrázek 20: Změna ohniskové vzdálenosti před a po použití úhlového stolku
a) Ohnisková vzdálenost 1 000 mm, b) 1/2 průměr svazku paprsku 10 mm A^*) Vzdálenost úhlového stolku od podkladové desky laseru 225 mm B^*) 1/2 průměr svazku paprsku při ozařování materiálu na úhlovém stolku 2,25 mm

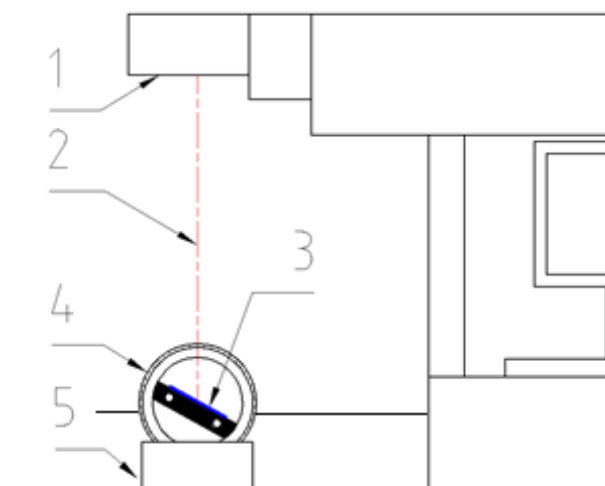
6 Metody experimentu

6.1 Ozařování materiálu

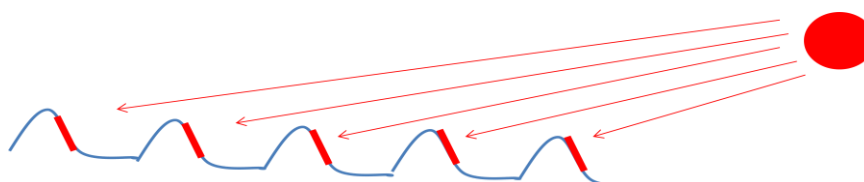
Nejprve se textilní materiál položil na podkladovou desku laseru. Na takto připravený materiál se infračerveným zářením vypálily čtverce o různých délkách pulzu (30, 100, 250, 350, 400, 550 A 700 μ s) s intenzitou záření 40 dpi (počet bodů na jeden palec).

V další fázi ozařování se materiál upevnil na desku úhlového stolku, který se vložil pod laserovou hlavu ve stejné úrovni, jako je laserová podkladová deska (obrázek 21). Na vlasovou textilií se vypálilo logo technické univerzity pod úhlem laserového paprsku 20° , délce pulzu 50 μ s a intenzitou záření 40 dpi. Po ozaření se materiál otočil o 180° a v tom samém místě se vypálilo logo textilní fakulty.

Závěrem se na textilní materiál vypálil vzor ve tvaru čtverce pod definovanými úhly laserového paprsku (20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 a 90°) o délce pulzu 50 μ s a intenzitou záření 40 dpi. U všech připravených vzorků se hodnotily změny pevnosti a vizualizace materiálu zkouškami popsanými níže.



Obrázek 21: Schéma působení laseru na textilní materiál pod úhlem
 1) laserová hlava, 2) infračervené záření, 3) textilní materiál, 4) úhlový stolek,
 5) stojan pro přesné nastavení úhlu



Obrázek 22: Schéma ozáření vlasové textilie laserovým paprskem

6.2 Snímání ozářených vzorků

Vypálené vzory s rozdílnými délkami pulzu se upevnilly na úhlový stolek a po jednom se nasnímalý pod definovanými úhly. Tato metoda byla využita z důvodu, že tento způsob analýzy neumožňuje žádný spektrofotometr. Na vytvoření snímku se použilo digitální fotografické zařízení Canon EOS 400D, které bylo propojené s počítačem, kam se obrázky automaticky ukládaly, viz obrázek 23. Fotografie se

pořizovaly ve vzdálenosti 100 mm od textilního materiálu se snímacími úhly 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 a 90° a jejich rozlišení bylo 72x72 dpi.



Obrázek 23: *Postup snímání ozářených vzorků*

6.3 Obrazová analýza

Cílem obrazové analýzy bylo zjistit a porovnat změnu barevnosti a chlupatosti materiálu po působení laserového záření. U nasnímaných vypálených čtverců se pomocí programu ImageJ naměřila plocha základní tkaniny a plocha vlasového útku, jejich průměrné RGB hodnoty a průměrné RGB hodnoty základní tkaniny s vlasovým útkem.

Podle uvedeného vzorce níže se ze získaných hodnot vypočítaly RGB hodnoty základní tkaniny s vlasovým útkem. Výsledky naměřených a vypočítaných RGB hodnot základní tkaniny s vlasovým útkem byly v programu Excel uspořádány do grafů, které můžeme vidět v kapitole vyhodnocení výsledků experimentů.

Vzorec pro výpočet červené oblasti základní tkaniny s vlasovým útkem

$$R = S_t * R_t + S_v * R_v / (S_t + S_v)$$

S_t plocha základní tkaniny

R_t červená oblast základní tkaniny

S_v plocha vlasového útku

R_v červená oblast vlasového útku

6.4 Pevnost textilie

Testování pevnosti textilního materiálu se provádělo na přístroji Dynamometr TIRATEST 2300. Přístroj je řízený počítačem a umožňuje zkoušky jednoosého namáhání v tahu a tlaku. Rozsah přístroje je možné měnit výměnou měřících hlav.

Na zkoušku se připravily vzorky, které byly střiženy po osnově. Některé vzorky byly ozářeny laserovým paprskem s rozdílnou délkou laserového pulzu. Zbylé vzorky byly ozářeny pod rozdílným úhlem se stejným nastavením parametrů laseru.

Také se testoval neozářený materiál pro srovnání změny mechanických vlastností způsobené laserovým ozářením.

6.5 Rastrovací elektronová mikroskopie

Elektronová mikroskopie umožňuje sledování materiálů při velmi velkém zvětšení. Je to dáno vlnovou délkou záření, která je výrazně kratší, než je vlnová délka viditelného světla při klasické optické mikroskopii. Elektronová mikroskopie tak umožňuje studium velice jemných detailů na povrchu materiálů [29].

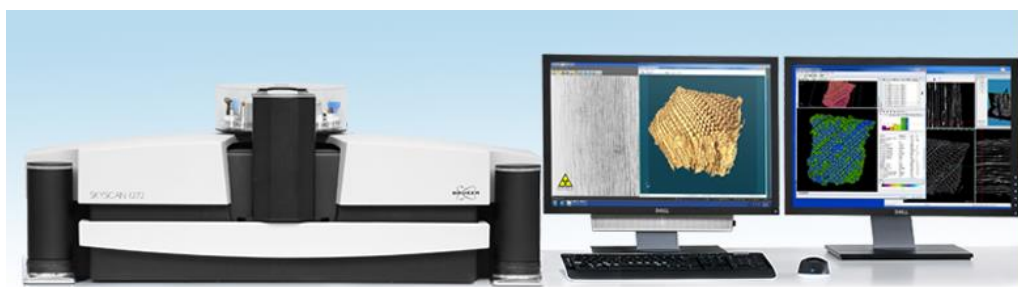
Rastrovací elektronový mikroskop pracuje s vakuem 10^{-2} [Pa], proto se musí preparát speciálně připravit naprášením kovu, zlatého prášku.

Měření připravených vzorků proběhlo na rastrovacím elektronovým mikroskopu VEGA-TESCAN. Snímky byly vytvořeny pro deset testovaných textilií. Pět textilií bylo ozářeno laserovým paprskem o rozdílné délce pulzu laseru. Na čtyři vzorky se působilo laserem stejného nastavení, ale pod různými úhly. Nakonec se testoval materiál bez působení laserového paprsku.

6.6 Počítačová tomografie

Počítačová tomografie je moderní metoda, která umožňuje kvalitní zobrazení vnitřních struktur různých objektů. Na pozorování změny struktury materiálu byl použit stolní mikro-tomografický přístroj SkyScan 1272, který je znázorněný na obrázku 24. Přístroj se využívá na analýzu a vizualizaci struktur textilních materiálů, kompozit apod.

Vzorek se nejdříve naskenuje ve formě 2D obrazů, které se za pomoci specializovaného programu (rekonstrukční software) převede na objekt 3D. Počítačová tomografie umožňuje analyzovat délku a velikost objektu, jeho tvar, orientaci, porozitu ale také umožňuje skenování materiálu během komprese, napětí, chlazení nebo ohřevu. Rozlišení přístroje je až 0,35 μm , maximální velikost testovaného vzorku 75 mm v průměru a 70 mm na délku [30].



Obrázek 24: Mikro-tomografický přístroj SkyScan 1272 [31]

Počítačový tomograf SkyScan 1272 je vybaven:

- Uzavřenou, vzduchem chlazenou rentgenkou s napětím 20 - 100 kV, 0 - 250 μA (10 W_{max})
- 16 Mpx detekční CCD kamerou
- Monitorizovanými držáky vzorků pro plynulé nastavení polohy vzorku vůči zdroji záření a CCD kameře
- 2 kontrolními počítači s LCD monitory
- Softwarovým vybavením pro kompletní 2D a 3D kvantitativní analýzu, pro morfometrii (měření tvaru) a denzitometrii (pro měření optických hustot zpracovávaných fotografických záznamů), pro realistické 3D vizualizace zkoumaných objektů apod. [32]

7 Vyhodnocení výsledků experimentů

V této části práce jsou obsaženy výsledky všech zkoušek a vyhodnocování celého experimentu. V první fázi se zkoumalo působení laserového záření na textilní materiál při různých délkách pulzu. Díky výsledkům se zjistily nejlépe vyhovující parametry nastavení laseru pro širokořádkový manšestr, které se využily v další části experimentu. Dále se vytvářela nová technologie vzorování vlasových textilií. U nové úpravy vlasového materiálu působí laserové záření na materiál pod různými úhly. Proto se v závěru práce zkoumala změna struktury materiálu pod definovanými úhly. Výsledné hodnoty jsou znázorněny v grafech a na snímcích.

7.1 Působení laseru na materiál při různé délce pulzu

Na vlasovou textilií se působilo infračerveným laserovým zářením o délkách pulzu, které jsou definované výše. Při záření většími délkami pulzu polyesterový vlasový útek tmavnul, jelikož se jeho vlákna tavila a spojovala dohromady. Ze základní tkaniny se po působení laseru odstranilo barvivo, proto je světlejší., jak je znázorněné na obrázku 26. Změny materiálu způsobené laserem se hodnotily obrazovou analýzou, zkouškou pevnosti materiálu a rastrovacím elektronovým mikroskopem.



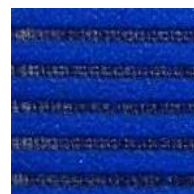
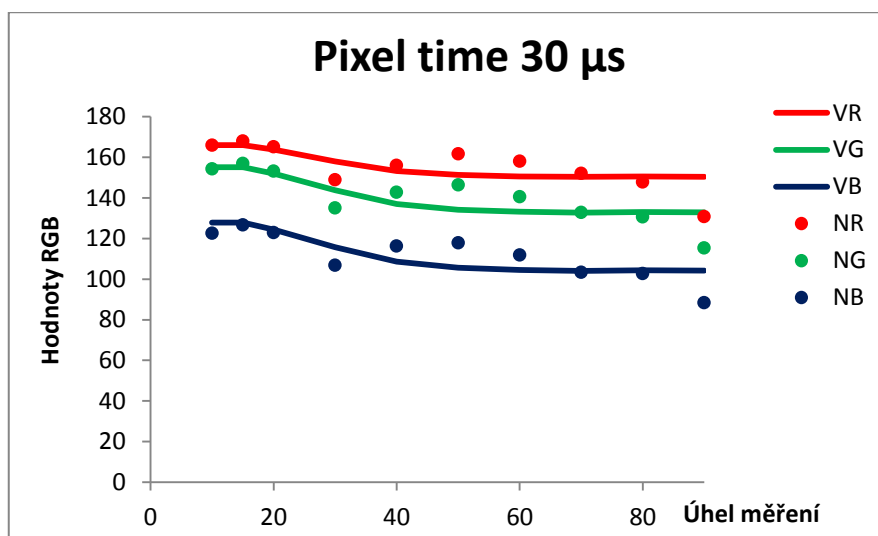
Obrázek 25: *Vypálení vzoru o různých délkách pulzu laserového záření od nejnižší intenzity laseru po nejvyšší z leva doprava*



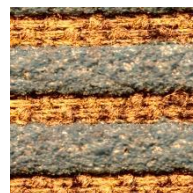
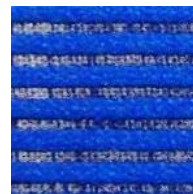
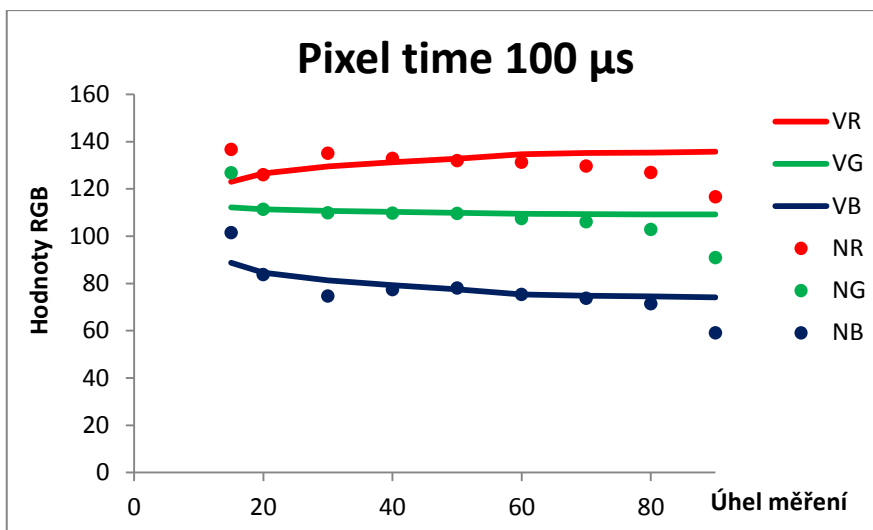
Obrázek 26: Barevné změny vlasového materiálu po působení laserového záření při délce pulzu 700 μs

7.1.1 Obrazová analýza

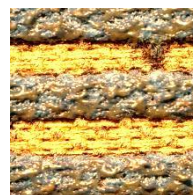
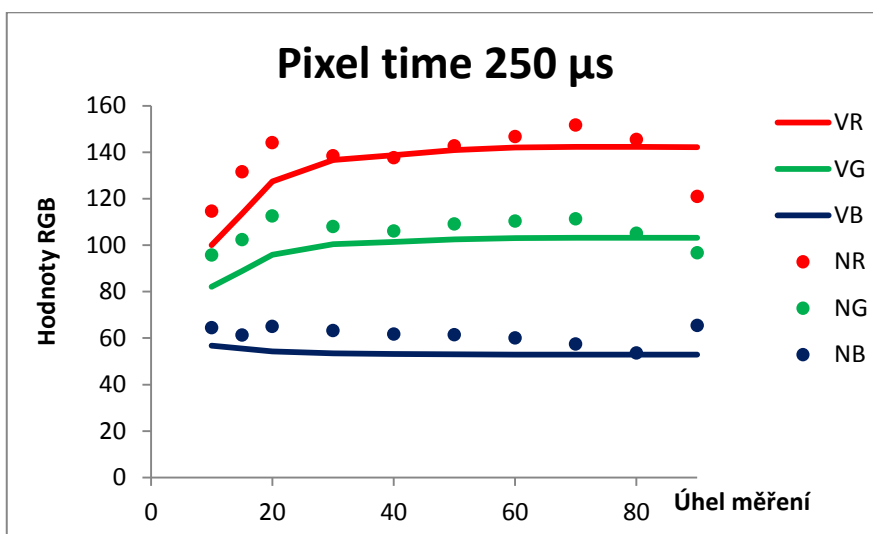
Změny barevností vzorků pro různé intenzity ozáření laserem a různé úhly pozorování. Zobrazena legenda u grafů obrazové analýzy znamená: VR, VG, VB - vypočítané RGB hodnoty a NR, NG, NB – naměřené RGB hodnoty.



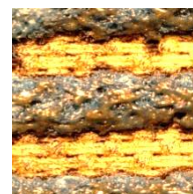
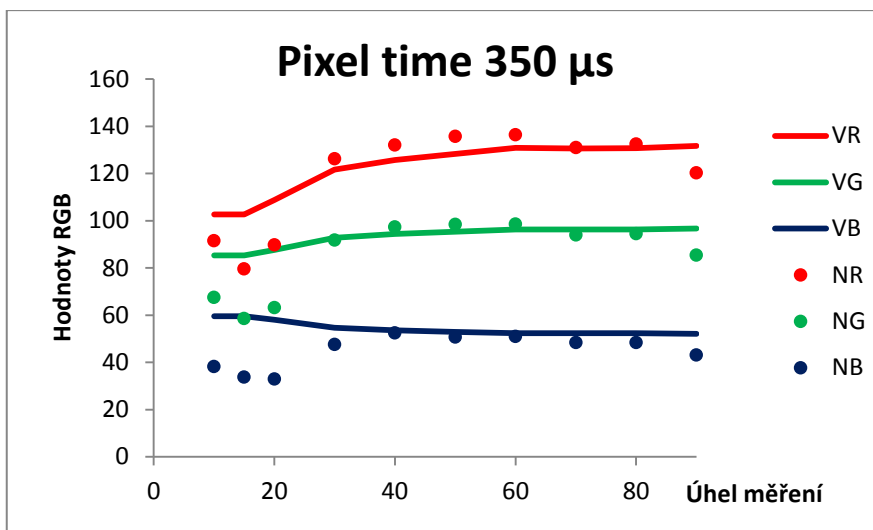
Graf 1: Průměrné RGB hodnoty ozářené textilie o intenzitě 30 μs . V pravé části nahoře je vizualizace snímku s běžným objektivem a dole obrázek snímány s makro objektivem pod úhlem pozorování 90°



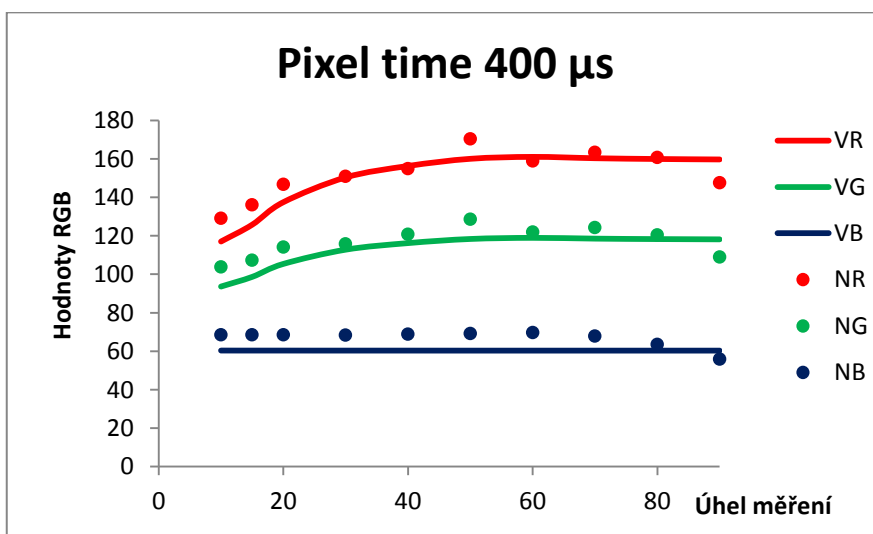
Graf 2: Průměrné RGB hodnoty ozářené textilie o intenzitě 100 μ s. V pravé části nahoře je vizualizace snímku s běžným objektivem a dole obrázek snímány s makro objektivem pod úhlem pozorování 90°



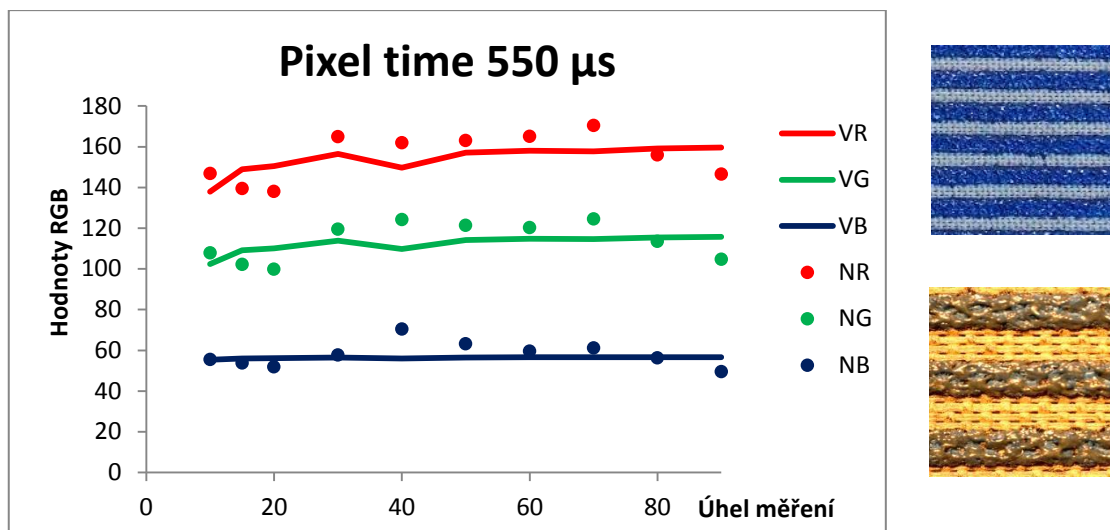
Graf 3: Průměrné RGB hodnoty ozářené textilie o intenzitě 250 μ s. V pravé části nahoře je vizualizace snímku s běžným objektivem a dole obrázek snímány s makro objektivem pod úhlem pozorování 90°



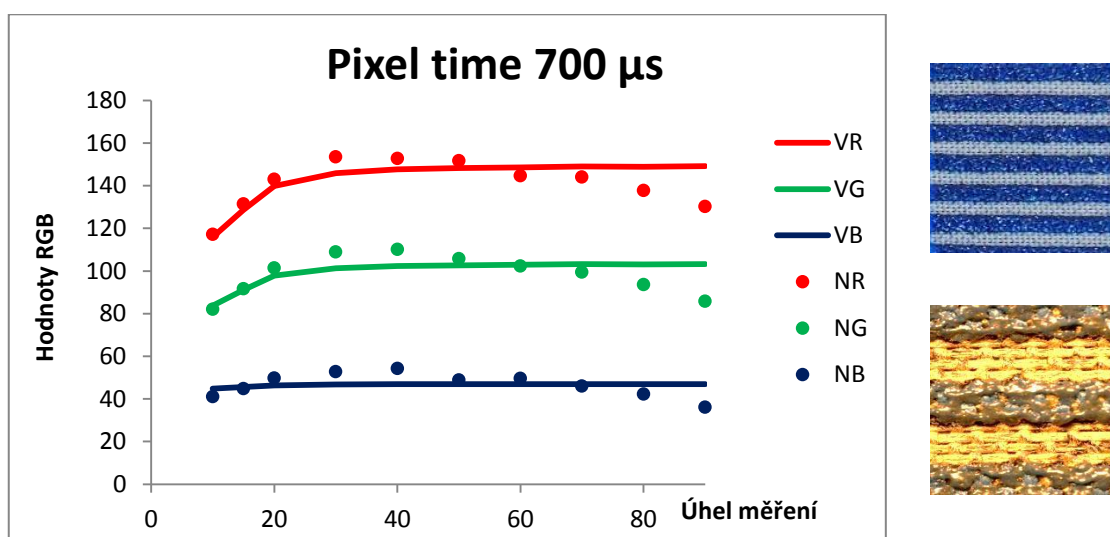
Graf 4: Průměrné RGB hodnoty ozářené textilie o intenzitě 350 μ s. V pravé části nahoře je vizualizace snímku s běžným objektivem a dole obrázek snímány s makro objektivem pod úhlem pozorování 90°



Graf 5: Průměrné RGB hodnoty ozářené textilie o intenzitě 400 μ s. V pravé části nahoře je vizualizace snímku s běžným objektivem a dole obrázek snímány s makro objektivem pod úhlem pozorování 90°



Graf 6: Průměrné RGB hodnoty ozářené textilie o intenzitě 550 μ s. V pravé části nahoře je vizualizace snímku s běžným objektivem a dole obrázek snímány s makro objektivem pod úhlem pozorování 90°



Graf 7: Průměrné RGB hodnoty ozářené textilie o intenzitě 700 μ s. V pravé části nahoře je vizualizace snímku s běžným objektivem a dole obrázek snímány s makro objektivem pod úhlem pozorování 90°

Z grafů je patrné, že úhel náklonu má rozdílný vliv na barevnost. U nízkých délek pulzů se dosahuje vysokých hodnot, světlého zbarvení při nízkém úhlu pozorování. Zajímavé je, že po určité dávce záření se geometrie vzorků dále nemění. Po ozáření vlasového útku vyššími pulzy se polyesterová vlákna ztaví a změní se tak výška vlasové textilie, proto se barevnost nemění tak výrazně.

U nastavení délky pulzu infračerveného záření 700 μs bylo poškození materiálu tak velké, že další testování této intenzity pro nás nemělo význam. Místo toho se testovala délka pulzu laserového záření 50 μs , protože nejvíce vyhovovala na vzorování vybraného manšestru v další části experimentu.

7.1.2 Pevnost materiálu

Zkušební přístroj: Dynamometr TIRATEST 2300

Podmínky laboratoře: 20°C, 65% RH

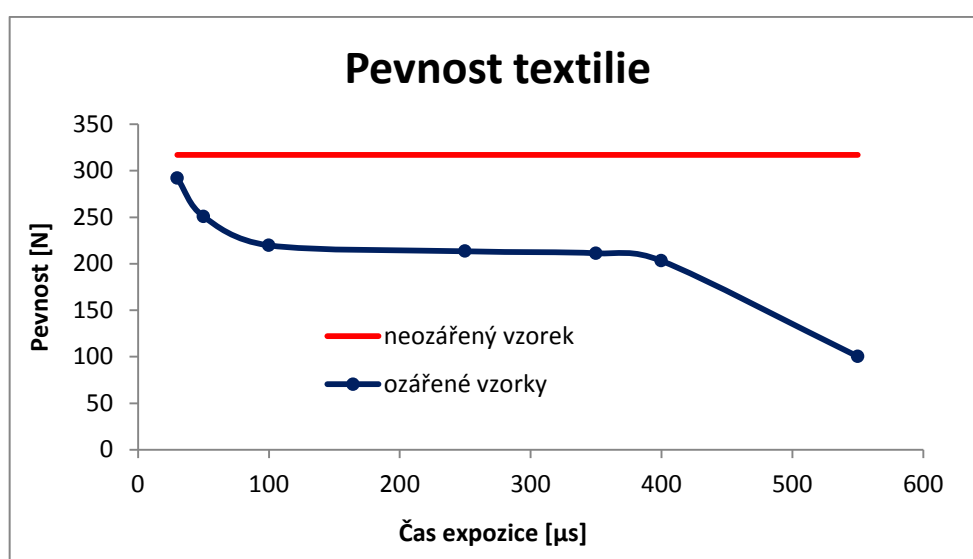
Rychlost protahování: 10 mm/min

Upínací délka vzorku: 100 mm

Typ připraveného zkušebního vzorku: proužek

Předpětí: Vypnuto

Průběh zkoušky: působení síly až do narušení vzorku

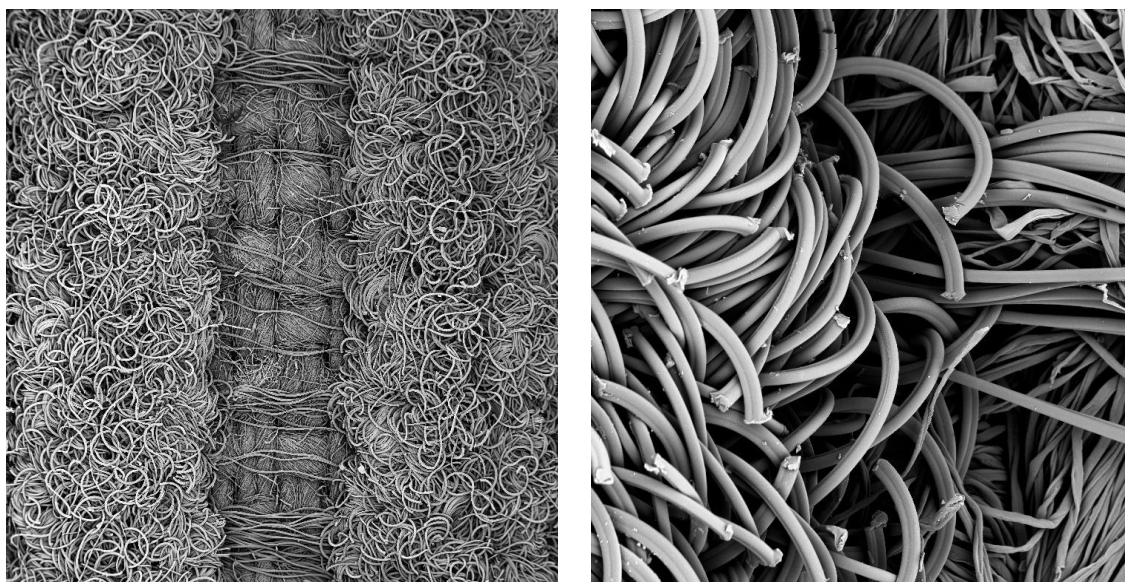


Graf 8: Pevnost materiálu s rozdílnými intenzitami laserového záření

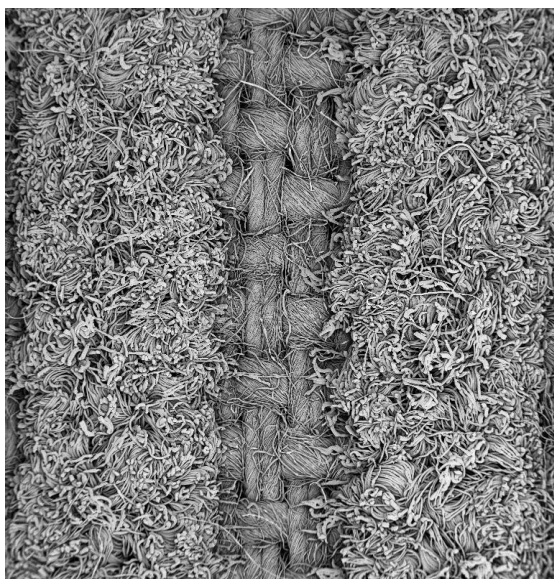
Z grafu je patrné, že s větší délkou pulzu laserového paprsku klesá pevnost materiálu. Hodnoty nejnižší pulzové délky se přibližují k hodnotám neozářené textilie, což dokazuje malé poškození materiálu po působení laseru.

7.1.3 Rastrovací elektronová mikroskopie

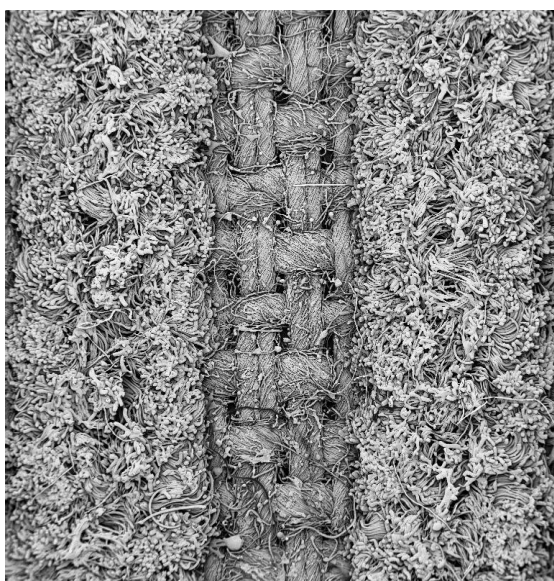
Na rastrovací elektronovou mikroskopii bylo vybráno 5 vzorků s laserovým zářením 30, 50, 100, 350 a 550 μs , a jeden neozářený vzorek pro lepší srovnání změny struktury na povrchu materiálu po působení laseru. Použito bylo stejné zvětšení u všech snímků a to 2 mm a 200 μm .



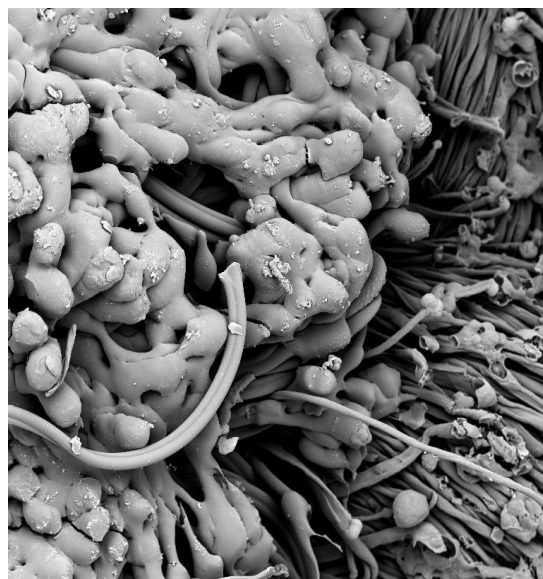
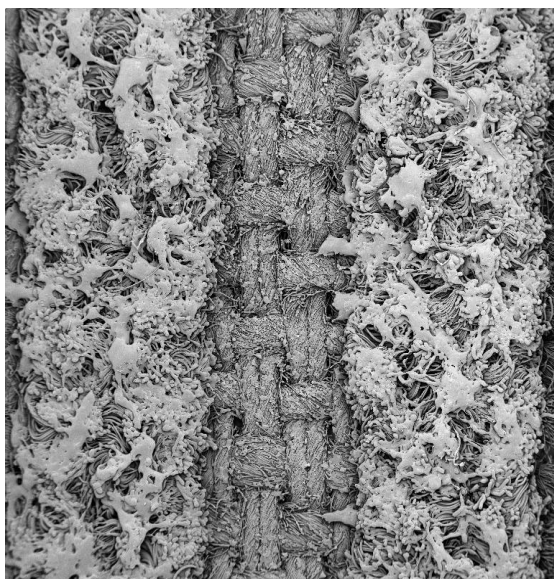
Obrázek 27 a 28: Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu neozářené textilie



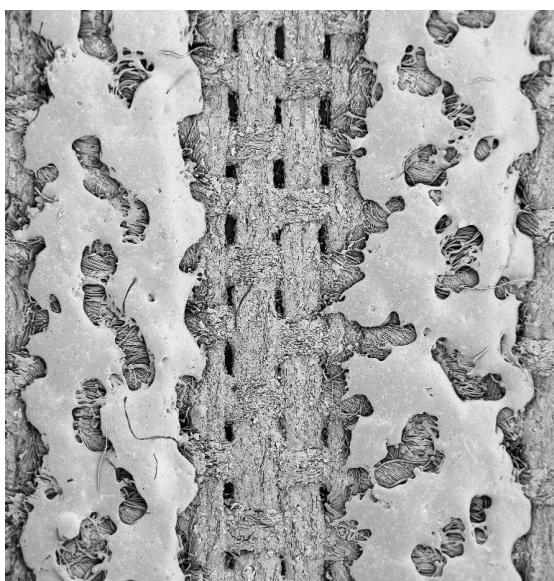
Obrázek 29 a 30: Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu ozářené textilie
pixel time 30 μ s



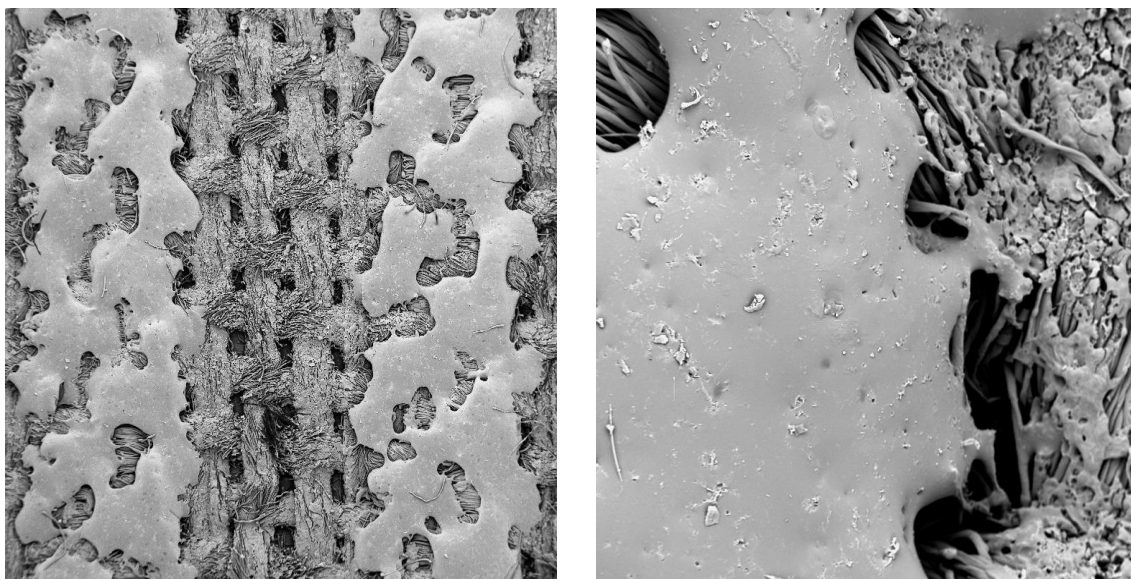
Obrázek 31 a 32: Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu ozářené textilie
pixel time 50 μ s



Obrázek 33 a 34: Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu ozářené textilie
pixel time 100 μ s



Obrázek 35 a 36: Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu ozářené textilie
pixel time 350 μ s

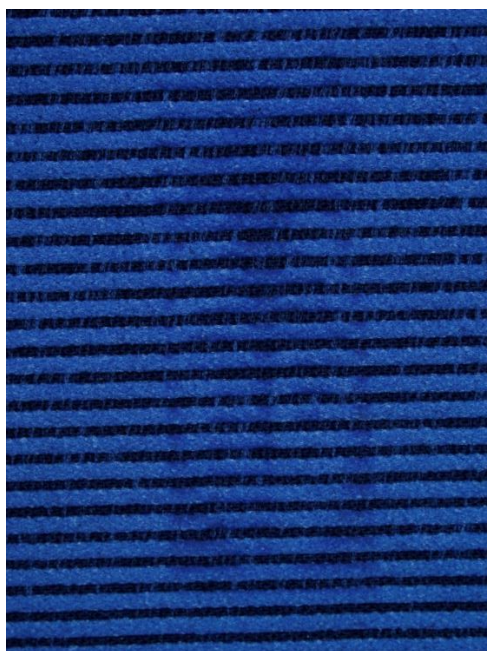


Obrázek 37 a 38: Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu ozářené textilie pixel time 550 μ s

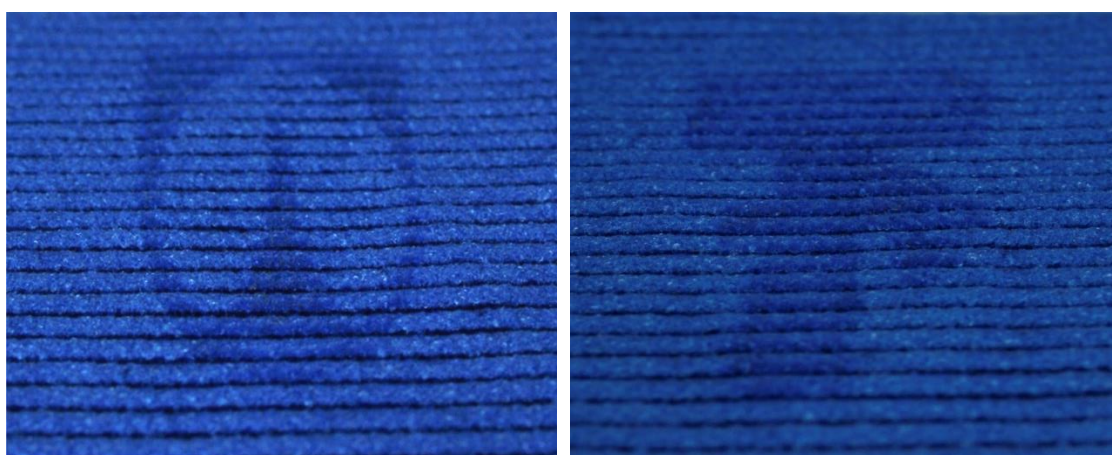
Při větších intenzitách se polyesterová vlákna vlasového útku tavila a spojovala dohromady jak je znázorněné na snímcích. Což má za následek ztmavnutí materiálu po působení laserového paprsku, ale také poškození a narušení základní tkaniny, které vedlo k protrhnutí materiálu.

7.2 Vzorování vlasových materiálů

Pro vytvoření speciální úpravy vlasových textilií pomocí laserového záření se využil jejich potenciál jako je členitost textilie, která vytvořila optické efekty. Na materiál se působilo laserovým zářením s rozlišením 40 dpi a s délkou pulzu 50 μ s. Pro vytvoření nového efektu se ozařoval vzorek po úhlem 20° z jedné i z druhé strany. Výsledkem je oboustranné vypalování vzoru, jak je znázorněné na obrázku 39, 40 a 41.



Obrázek 39: Pozorování voru pod úhlem 90°



Obrázek 40 a 41: Pozorování vzoru pod úhlem 20° a 160°

7.3 Působení laseru na materiál pod různými úhly

Laserový paprsek působil na vlasovou textilií pod úhlem 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80° a 90°. Délka pulzu infračerveného záření byla 50 μ s a intenzita laserového paprsku 40 dpi. Změny materiálu způsobené laserovým zářením pod různými úhly se hodnotily zkouškou pevnosti materiálu, rastrovacím elektronovým mikroskopem a počítačovou tomografií.

7.3.1 Pevnost materiálu

Zkušební přístroj: Dynamometr TIRATEST 2300

Podmínky laboratoře: 20°C, 65% RH

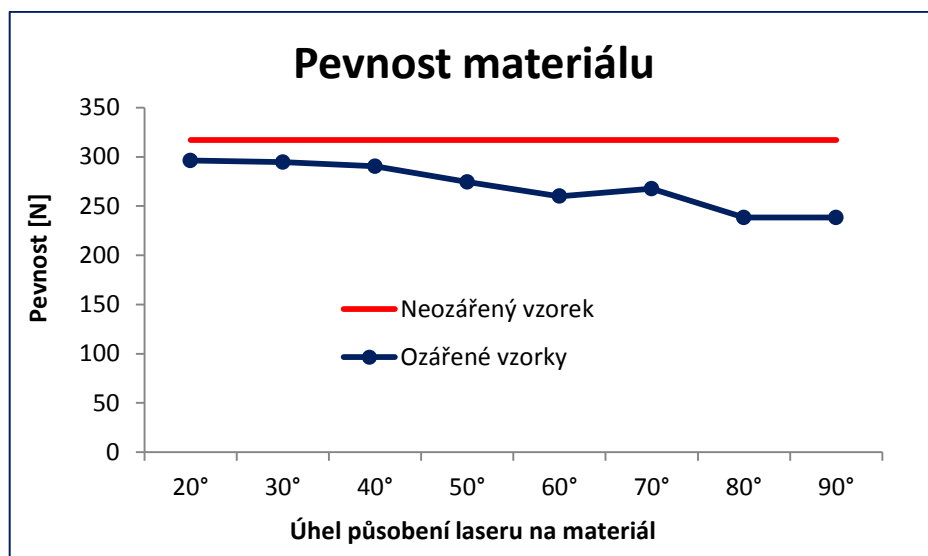
Rychlost protahování: 10 mm/min

Upínací délka vzorku: 100 mm

Typ připraveného zkušebního vzorku: proužek

Předpětí: Vypnuto

Průběh zkoušky: působení síly až do narušení vzorku

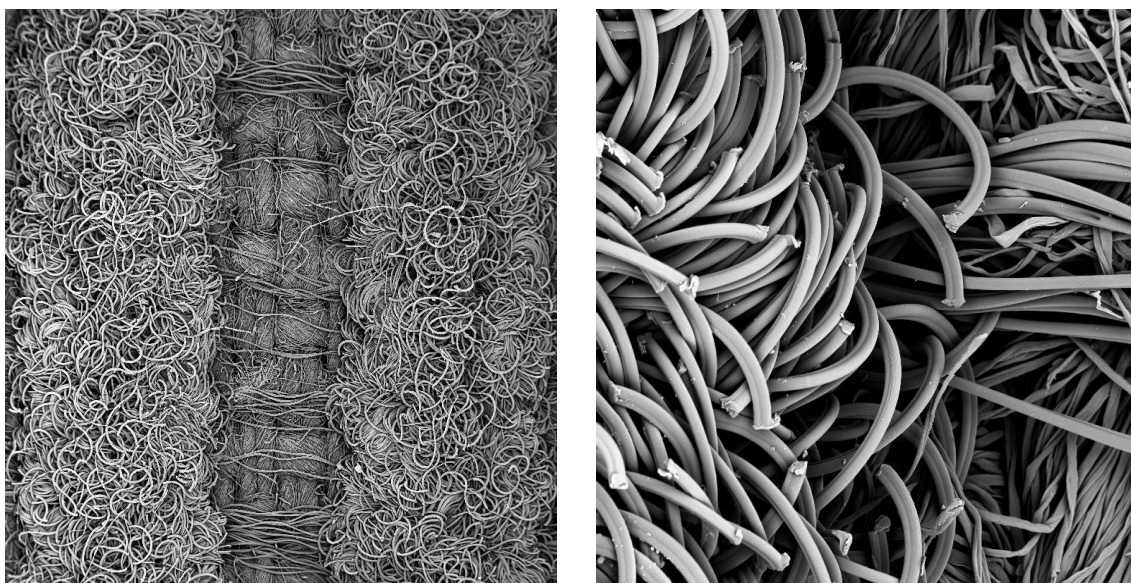


Graf 9: Pevnost materiálu s působením laserového záření pod různými úhly

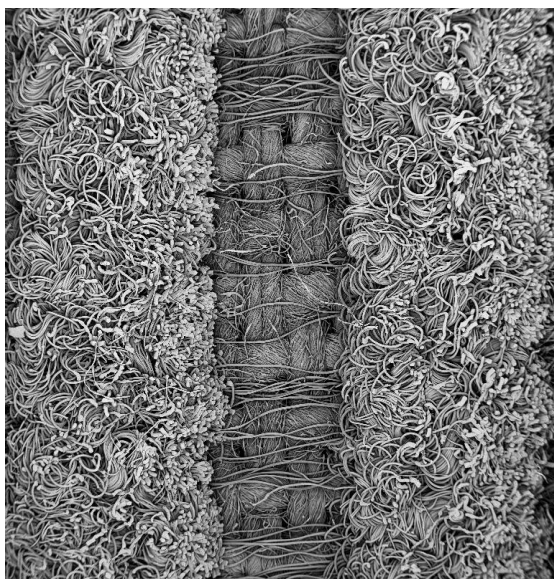
Při dopadu laseru na textilní materiál pod nízkým úhlem se poškozuje jen část vlasového útku, proto se pevnost materiálu výrazně nemění. Zato u větších úhlu se poškozuje kromě vlasového útku i základní tkanina a pevnost materiálu klesá.

7.3.2 Rastrovací elektronová mikroskopie

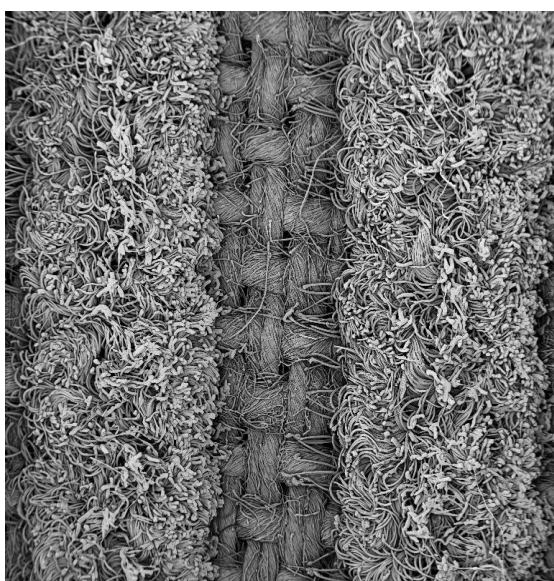
Na rastrovací elektronovou mikroskopii byly vybrány 4 ozářené vzorky pod úhlem 20°, 40°, 60° a 90°, a jeden neožářený vzorek pro lepší srovnání změny struktury na povrchu materiálu po působení laserového paprsku. Použito bylo stejné zvětšení u všech snímků a to 2 mm a 200 μm .



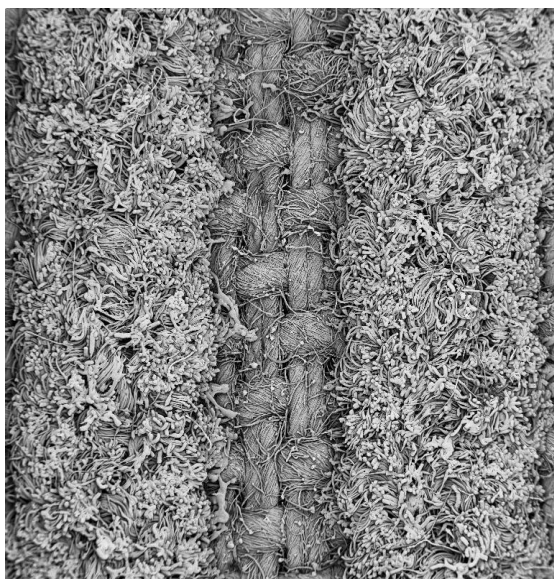
Obrázek 42 a 43: Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu neožářené textilie



Obrázek 44 a 45: *Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu ozářené textilie pod úhlem 20°*



Obrázek 46 a 47: *Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu ozářené textilie pod úhlem 40°*



Obrázek 48 a 49: Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu ozářené textilie pod úhlem 60°

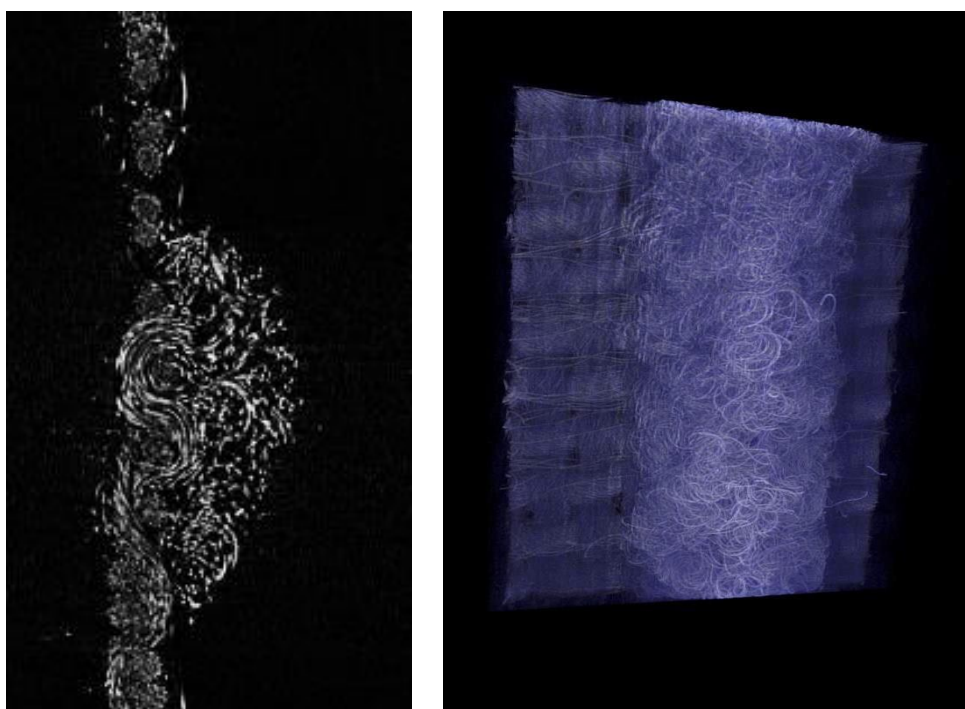


Obrázek 50 a 51: Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu ozářené textilie pod úhlem 90°

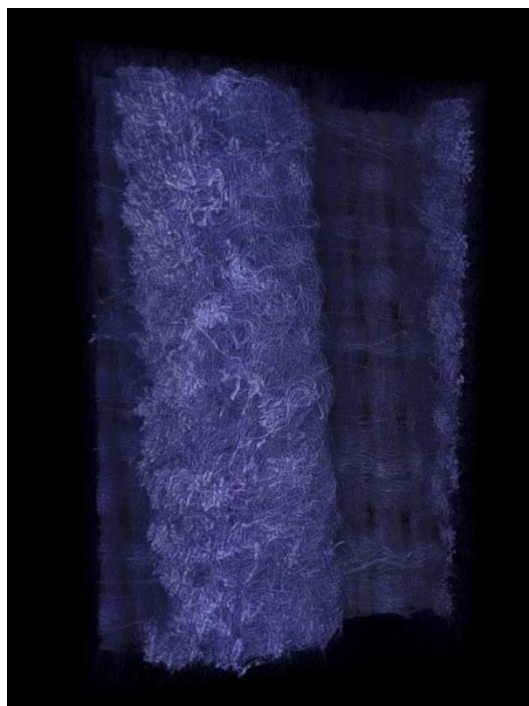
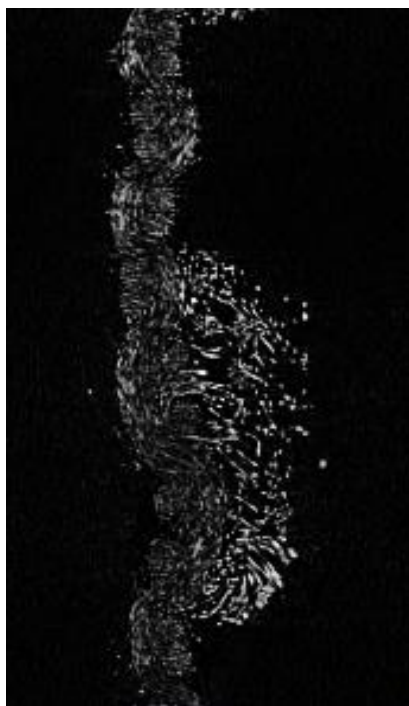
Na snímcích z rastrovacího elektronového mikroskopu se dokázalo, že u působení laseru na textilní materiál pod nízkým úhlem se poškozuje jen část vlasového útku. Čím je nastavený úhel laseru větší, tím se více poškozuje vlasový útek, polyesterová vlákna se taví a narušuje se vazba základní tkaniny.

7.3.3 Počítačová tomografie

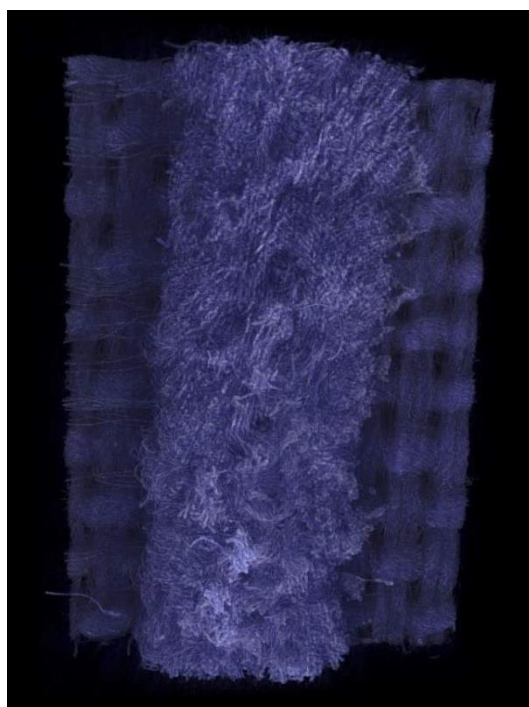
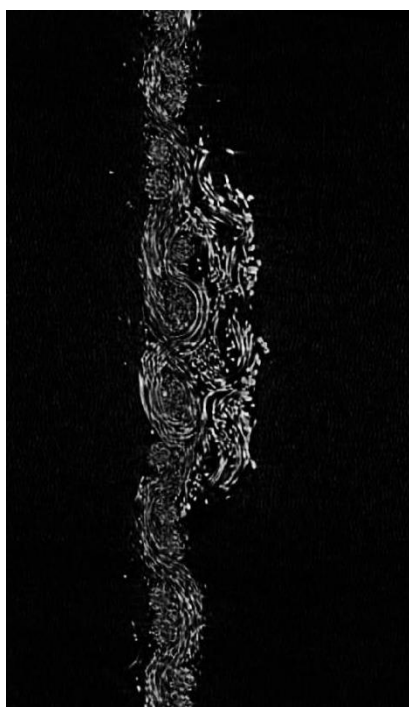
Počítačovou tomografií se porovnávaly 3 vzorky textilního materiálu. První vzorek byl neozářený a na další dva se působilo laserovým paprskem pod 20° a 90° úhlem o intenzitě laseru 50 dpi a délce pulzu laserového záření 35 μ s. Na snímku jsou znázorněné řezy vlasové textilie a jejich struktura.



Obrázek 52 a 53: *Snímek z počítačové tomografie neozářené textilie*



Obrázek 54 a 55: *Snímek z počítačové tomografie ozářené textilie pod úhlem 20°*



Obrázek 56 a 57: *Snímek z počítačové tomografie ozářené textilie pod úhlem 90°*

Snímky řezu materiálu z počítačové tomografie ukazují, že při ozáření textilie pod větším úhlem se vlasový útek zarovnává a mění se jeho tloušťka. U nízkého úhlu je ozářená část jen nepatrně vidět, proto se může srovnávat s neozářeným materiálem.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo vytvořit speciální úpravu vlasové textilie pomocí laserového infračerveného záření. Nejprve se na zvolený materiál působilo laserovým zářením o různých délkách pulzu laserového paprsku. Díky výsledkům prováděných zkoušek se zjistilo, že nejlepšími parametry nastavení laserového paprsku pro vzorování vybraného širokořádkového manšestru je délka pulzu 50 μ s při 40 dpi.

Dále byl vlasový materiál ozářen infračerveným zářením o délce pulzu 50 μ s při 40 dpi pod různými úhly náklonu stolku, aby se zjistilo jaký vliv má úhel záření laserového paprsku na změnu struktury materiálu.

V práci se zjistilo, že díky délce pulzu laserového záření jsme schopni predikovat barevnost vlasové textilie pod různými úhly pozorování. Čím větším pulzem se na textilní materiál působí, tím více se polyesterová vlákna taví a tmavnou. U základní bavlněné tkaniny je efekt opačný a to díky rozkladu barviva ve vláknech

. Pro vizualizaci změny struktury vlasové textilie byly použity moderní metody, jako je například počítačová tomografie. Na snímkách se zjistilo, že při působení laserového paprsku na vlasovou textilií pod nízkým úhlem se poškozuje jen nepatrná část vlasového útku textilie a tak se její struktura téměř nemění. Proto by se mohlo vzorování vlasových materiálů využívat například pro vytvoření propagačních materiálů.

Příklad využití „vypalování pod úhlem“: Vlasová textilie se modifikovala vypalováním loga technické univerzity pod úhlem záření 20°. Díky náklonu materiálu působil laserový paprsek jen na část vlasového útku manšestru a tak bylo možné na stejné místo vypálit po otočení materiálu o 180° logo textilní fakulty. Při běžném pozorování se na materiálu zobrazuje nic neříkající vzor, ale pod pozorovacím úhlem 20° jde vidět vypálené logo univerzity a pod pozorovacím úhlem 160° logo fakulty.

Seznam obrázků

- 1** - Princip laseru [5]
- 2** - Dekorace skla pomocí laseru [8]
- 3** - Princip hologramu [3]
- 4** - Holografický papír [9]
- 5** - Laserové řezání textilu [14]
- 6** - Výšivka před a po působení laserového záření [19]
- 7** - Návrh vzoru v programu Adobe Photoshop a jeho zhotovení na kalhoty [23]
- 8** - Vypalování vzoru na zřasenou textilií [23]
- 9** - Vypalování vzoru na skládanou textilií [23]
- 10** - Oděvy s laserovým vzorem [23]
- 11** - Vypálení vzoru na polyesterovou tkaninu [24]
- 12** - Vypálení trojrozměrného vzoru [24]
- 13** - Vypalování barevného efektu na oděv [24]
- 14** - Příčný řez po utkání a po úpravě sametu
- 15** - Příčný řez po utkání a po úpravě manšestru
- 16** - Laserové zařízení Marcatex Flexi 150 [28]
- 17** - Širokořádkový manšestr
- 18** - Úhlový stolek
- 19** - Úhel ozařování textilního materiálu laserem
- 20** - Změna ohniskové vzdálenosti před a po použití úhlového stolku
- 21** - Schéma působení laseru na textilní materiál pod úhlem
- 22** - Schéma ozáření vlasové textilie laserovým paprskem
- 23** - Postup snímání ozářených vzorků
- 24** - Mikro-tomografický přístroj SkyScan 1272 [31]
- 25** - Vypálení vzoru o různých délkách pulzu laserového záření od nejnižší intenzity laseru po nejvyšší z leva doprava
- 26** - Barevné změny vlasového materiálu po působení laserového záření při délce pulzu 700 μ s

- 27 a 28** - Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu neozářené textilie
- 29 a 30** – Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu ozářené textilie pixel
time 30 μ s
- 31 a 32** – Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu ozářené textilie pixel
time 50 μ s
- 33 a 34** – Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu ozářené textilie pixel
time 100 μ s
- 35 a 36** – Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu ozářené textilie pixel
time 350 μ s
- 37 a 38** – Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu ozářené textilie pixel
time 550 μ s
- 39** - Pozorování voru pod úhlem 90°
- 40** - Pozorování vzoru pod úhlem 20° a 160°
- 41** - Pozorování vzoru pod úhlem 160°
- 42 a 43** – Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu neozářené textilie
- 44 a 45** – Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu ozářené textilie pod
úhlem 20°
- 46 a 47** – Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu ozářené textilie pod
úhlem 40°
- 48 a 49** – Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu ozářené textilie pod
úhlem 60°
- 50 a 51** – Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu ozářené textilie pod
úhlem 90°
- 52 a 53** – Snímek z počítačové tomografie neozářené textilie
- 54 a 55** – Snímek z počítačové tomografie ozářené textilie pod úhlem 20°
- 56 a 57** – Snímek z počítačové tomografie ozářené textilie pod úhlem 90°

Seznam tabulek

- 1 - Pevnolátkové lasery [6]
- 2 - Kapalinové lasery [6]
- 3 - Plynové lasery [2]
- 4 - Polovodičové lasery [6]

Seznam grafů

- 1 – Průměrné RGB hodnoty ozářené textilie o intenzitě 30 μ s. V pravé části nahoře je vizualizace snímku s běžným objektivem a dole obrázek snímány s makro objektivem pod úhlem pozorování 90°
- 2 – Průměrné RGB hodnoty ozářené textilie o intenzitě 100 μ s. V pravé části nahoře je vizualizace snímku s běžným objektivem a dole obrázek snímány s makro objektivem pod úhlem pozorování 90°
- 3 – Průměrné RGB hodnoty ozářené textilie o intenzitě 250 μ s. V pravé části nahoře je vizualizace snímku s běžným objektivem a dole obrázek snímány s makro objektivem pod úhlem pozorování 90°
- 4 – Průměrné RGB hodnoty ozářené textilie o intenzitě 350 μ s. V pravé části nahoře je vizualizace snímku s běžným objektivem a dole obrázek snímány s makro objektivem pod úhlem pozorování 90°
- 5 – Průměrné RGB hodnoty ozářené textilie o intenzitě 400 μ s. V pravé části nahoře je vizualizace snímku s běžným objektivem a dole obrázek snímány s makro objektivem pod úhlem pozorování 90°
- 6 – Průměrné RGB hodnoty ozářené textilie o intenzitě 550 μ s. V pravé části nahoře je vizualizace snímku s běžným objektivem a dole obrázek snímány s makro objektivem pod úhlem pozorování 90°
- 7 – Průměrné RGB hodnoty ozářené textilie o intenzitě 700 μ s. V pravé části nahoře je vizualizace snímku s běžným objektivem a dole obrázek snímány s makro objektivem pod úhlem pozorování 90°

Literatura

- [1] FREITINGER SKALICKÁ Z., et al. *Radiobiologie* [online].[cit. 2015 01 05]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/8-kapitola/82/821.html>.
- [2] ŠULC J. Lasery a jejich aplikace. *Lasery a jejich aplikace* [online]. 2002, s. 6 [cit. 2015-01-05]. Dostupné z:<http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>.
- [3] Laser a jeho využití. In: *Skupina ČEZ* [online]. c2015 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm>.
- [4] DOHNAL M. *Lasery a jejich aplikace v polygrafii*. Vyd. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2008. ISBN 978-807-3950-439. [cit. 2015-01-05].
- [5] Co byste rádi věděli o průmyslových laserech. In: *MegaBlog* [online]. c2015 [cit.2015-01-06]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/co-byste-radi-vedeli-o-prumyslovych-laserech/>.
- [6] Rozdělení laserů. In: *Výzkumné centrum Západočeské univerzity v Plzni* [online]. © 2000 – 2015 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/rozdeleni-laseru>.
- [7] NAVRÁTIL L., ROSINA J., et al. *Medicínská biofyzika*. 1 (dotisk 2013) vydání. Grada Publishing, 2005. 524 s. s. 230-237. ISBN 978-80-247-1152-2.
- [8] Dekorace skla laser 24. In: *Sklo ve stavebnictví - InfoGLASS* [online]. © 2011 – 2014 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: <http://www.infoglass.cz/dekorace-skla-pomoci-laseru/dekorace-skla-laser-24/>.
- [9] Holografický papier A4. In: *SAShE.sk* [online]. © 2009 - 2015 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: <http://www.sashe.sk/SwanArt-material/detail/holograficky-papier-a4-kruh>.
- [10] LAPŠANSKÁ H. *Laserové technologie v praxi*. Olomouc, 13. prosince 2010. CZ.1.07/2.2.00/07.0018. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>. Projekt. Univerzita Palackého v Olomouci.

- [11] KAN Ch.W. Impact on textile properties of polyester with laser. *Optics*. 2008, vol. 40, issue 1, s. 113-119. DOI: 10.1016/j.optlastec.2007.03.005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030399207000424>.
- [12] CHOW F., CHAN Allan a KAN CH.W. Effect of CO₂ laser irradiation on the properties of cotton fabric. *Textile Research Journal*. 2012-04-24, vol. 82, issue 12, s. 1220.1234. DOI: 10.1177/0040517511429609. Dostupné z: <http://trj.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0040517511429609>.
- [13] Laser Cutting Textiles: for cotton, silk, felt, lace, synthetic & technical textiles, aramid, polyester, fleece. In: *Trotec laser machines for cutting, engraving and marking* [online]. © 2014 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: <http://www.troteclaser.com/en-US/Materials/Pages/Textiles.aspx>.
- [14] Přemýšlíte o pořízení laseru, možná vám pomůžeme. In: *MegaBlog* [online]. © 2015 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/premyslite-o-porizeni-laseru-mozna-vam-pomuzeme/>.
- [15] BAMFORTH P., WILLIAMS K. a JACKSON M.R. Edge quality optimisation for CO₂ laser cutting of nylon textiles. *Applied Thermal Engineering*. 2006, vol. 26, issue 4, s. 403-412. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.06.008. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431105002000>.
- [16] KAN, Ch.W. CO₂ laser treatment as a clean process for treating denim fabric. *Journal of Cleaner Production*. 2014, vol. 66, s. 624-631. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.11.054. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652613008251>.
- [17] KAN, Ch.W., YUEN M. a CHENG C.W. Technical study of the effect of CO₂ laser surface engraving on the colour properties of denim fabric. *Coloration Technology*. 2010, vol. 126, issue 6, s. 365-371. DOI: 10.1111/j.1478-4408.2010.00270.x. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1478-4408.2010.00270.x>.

- [18] OZGUNY A. T. The comparison of laser surface designing and pigment printing methods for the product quality. *Optics*. 2007, vol. 39, issue 5, s. 1054-1058. DOI: 10.1016/j.optlastec.2006.05.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030399206001010>.
- [19] ABDEL-KAREEM O. a HARITH M.A. Evaluating the use of laser radiation in cleaning of copper embroidery threads on archaeological Egyptian textiles. *Applied Surface Science*. 2008, vol. 254, issue 18, s. 5854-5860. DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.03.144. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433208006302>.
- [20] SODOMKA L. *Struktura, vlastnosti, diagnostika a nové technologie oddělování, spojování a pojení textilií*. první. Technická univerzita v Liberci, 2002. ISBN 80-7083-645-8.
- [21] TAPIAS M., RALLO M. a ESCOFET J. Automatic measurements of partial cover factors and yarn diameters in fabrics using image processing. *Textile Research Journal*. 2011-01-19, vol. 81, issue 2, s. 173-186. DOI: 10.1177/0040517510380107. Dostupné z: <http://trj.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0040517510380107>.
- [22] More Information on Laser Cutting Fabric. In: *Laser Cut Fabric* [online]. © 2010 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: <http://lasercutfabric.com/index.php/more-information-on-laser-cutting-fabric>.
- [23] YUAN G. X., JIANG S. X., NEWTON E., FAN Wai-man AU. Fashion Design Using Laser Engraving Technology. *Symposium-Panel on Transformation* [online]. c2015 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: <http://myweb.polyu.edu.hk/~tcshyam/8ISS/5-Panel%20on%20Transformation.pdf>.
- [24] YUAN G. X., JIANG S. X., NEWTON E., FAN W. AU. Application of laser treatment for fashion design. *Journal of the Textile Institute*. 2012, vol. 103, issue 1, s. 4854. DOI:10.1080/00405000.2010.542311. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00405000.2010.542311>.

- [25] Vlasová textilie. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Vlasov%C3%A1_textilie.
- [26] JAKUBEC J., HLAVATÝ F. *Vazby a rozborů tkanin: pro 3.ročníky středních průmyslových škol textilních*. první. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. ISBN 04-832-63.
- [27] Osnovní samet. In: *TEXSITE.info* [online]. © 2006 – 2008 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: http://cz.texsite.info/Osnovn%C3%AD_samet.
- [28] *Návod k obsluze: Marcatex 150/250 Flexi laserový systém* [online]. Španělsko: Easy-Lasery, S.L., 2003 [cit. 2015-01-07].
- [29] ČSN EN 5084 (80 0844). *Textilie - Zjišťování tloušťky textilií*. Praha: © Český normalizační institut, 1998.
- [30] VÁVRA V., PINKAS J. Využití elektronové mikroskopie při charakterizaci materiálů. In: *Přirodovědecká fakulta, Masarykova univerzita* [online]. © 2011 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: http://www.sci.muni.cz/chemsekce/c8870/pdf/Uloha9_elektr_mikr.pdf.
- [31] BAKALOVA T. , KOLÍNOVÁ M. Možnosti použití počítačové tomografie v technice. *Jemná mechanika a optika* [online]. 2014, č. 4 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: http://cxi.tul.cz/projekty-vav/Preseed_Lederer/04_Moznosti-pouziti-CT_JMO_2014.pdf.
- [32] SKYSCAN 1272: DESK-TOP HIGH-RESOLUTION MICRO-CT. In: *Bruker microCT* [online]. 2014 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: <http://www.skyscan.be/products/1272.htm>.

Příloha

Tabulka 6: Nastavení laseru při experimentech a vypočítaná energie pulzu

Pixel time [μs]	Pixel inch [dpi]	Energie pulzu [mJ]
30	40*40	2,45
50	40*40	4,09
100	40*40	8,18
250	40*40	20,45
350	40*40	28,64
400	40*40	32,73
550	40*40	45
700	40*40	57,27
35	50*50	2,7

Přepočítání nastavených parametrů laseru na energii pulzu

Výkon $P = 100 \text{ W}$

Frekvence $f = 5 \text{ kHz} = 5\,000 \text{ Hz}$

Pracovní cyklus 50 %

Vzorec:

Celková energie pulzu $= P/f = 100/5\,000 = 0,02 \text{ J} = 20 \text{ mJ}$

Vypočítaný příklad pro pixel time 35 μs, dpi 50*50

Energie pulzu $= f * \text{pixel time} * 10^{-6} = 5\,000 * 35 * 10^{-6} = 0,175 \text{ J}$

Energie pulzu * Celková energie pulzu $= 0,175 * 20 = 3,5 \text{ mJ}$ (pro černou barvu)

Energie pulzu = energie pulzu černé barvy * $(220 - \text{pixel colour}) / 220 = 3,5 * (220 - 50) / 220 = 2,7 \text{ mJ}$ (pro stupeň šedi)

Snímky z úhlového stolku na obrazovou analýzu

Laserová délka pulzu 30 μ s



úhel 10°



úhel 15°



úhel 20°



úhel 30°



úhel 40°



úhel 50°



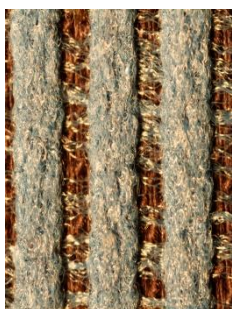
úhel 60°



úhel 70°



úhel 80°



úhel 90°

Laserová délka pulzu 100 μ s



úhel 15°



úhel 20°



úhel 30°



úhel 40°



úhel 50°



úhel 60°



úhel 70°



úhel 80°



úhel 90°

Laserová délka pulzu 250 μ s



úhel 10°



úhel 15°



úhel 20°



úhel 30°



úhel 40°



úhel 50°



úhel 60°



úhel 70°

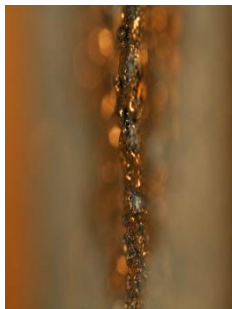


úhel 80°



úhel 90°

Laserová délka pulzu 350 μ s



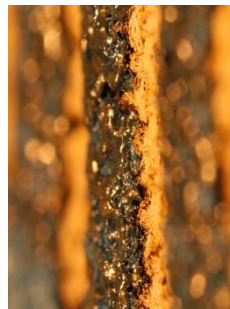
úhel 10°



úhel 15°



úhel 20°



úhel 30°



úhel 40°



úhel 50°



úhel 60°



úhel 70°



úhel 80°



úhel 90°

Laserová délka pulzu 400 μ s



úhel 10°



úhel 15°



úhel 20°



úhel 30°



úhel 40°



úhel 50°



úhel 60°



úhel 70°



úhel 80°



úhel 90°

Laserová délka pulzu 550 μ s



úhel 10°



úhel 15°



úhel 20°



úhel 30°



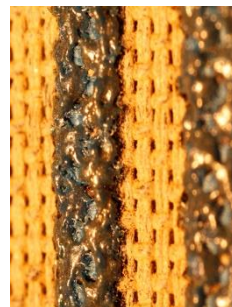
úhel 40°



úhel 50°



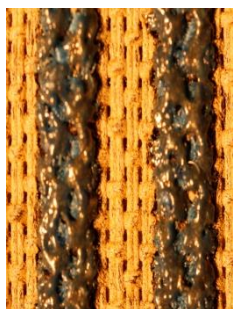
úhel 60°



úhel 70°



úhel 80°

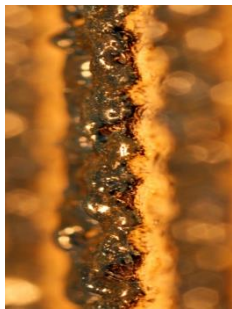


úhel 90°

Laserová délka pulzu 700 μ s



úhel 10°



úhel 15°



úhel 20°



úhel 30°



úhel 40°



úhel 50°



úhel 60°



úhel 70°



úhel 80°



úhel 90°